



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

LOŽISKA VE VESMÍRU

BEARINGS FOR SPACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Vavřík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Petr Vavřík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ložiska ve vesmíru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ložiska aktuálně používaná na satelitech na oběžné dráze musí pracovat bezporuchově po dobu delší než 10 let v nepříznivém kosmickém prostředí. Některé z ložisek pracují při vysokých otáčkách a jsou na ně přitom kladeny velmi vysoké nároky na spolehlivost a nízké ztráty kvůli energetické náročnosti. Jak spolehlivost, tak trvanlivost ložiska lze výrazně zlepšit pomocí volby vhodného ložiska a jeho maziva.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Návrh řešení mazání ložiska pro konkrétní aplikaci definovanou v průběhu řešení.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- přehled typů ložisek používaných ve vesmíru,
- přehled možností mazání ložisek na nízké oběžné dráze,
- popis nejčastějších řešení mazání vysokootáčkových mechanismů,
- zhodnocení informací z rešerše a návrh nejlepšího řešení mazání ložiska pro konkrétní aplikaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

JONES, W. R. a M. J. JANSEN. Tribology for space applications. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2008, 222(8), 997-1004. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET305.

ZARETSKY, E. V. Liquid lubrication in space. Tribology International [online]. 1990, , 75-93.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V současné době se od vesmírných satelitů na oběžné dráze požaduje bezporuchový provoz delší než 10 let. To přináší vysoké nároky na tribologické systémy satelitu, které musí po tuto dobu správně fungovat v nehostinném kosmickém prostředí. Tato bakalářská práce se zabývá popisem vhodných ložisek a jejich mazání pro vesmírné aplikace. Na úvod jsou popsány režimy mazání. Dále jsou shrnuty faktory vesmíru ovlivňující správný chod tribologických systémů. Největší část je věnována popisu nejvyžívanějších ložisek a maziv. V závěru práce je proveden návrh vhodných ložisek a jejich mazání pro reakční kolo satelitu.

KLÍČOVÁ SLOVA

valivá ložiska, mazivo, elastohydrodynamické mazání, vesmír, satelit

ABSTRACT

Currently, space satellites in orbit are required to operate reliably for more than 10 years. This places high demands on the satellite's tribological systems, which must function properly in the hostile space environment for this period. This bachelor thesis deals with the description of suitable bearings and their lubrication for space applications. Lubrication regimes are described at the outset. Then, space factors affecting the proper operation of tribological systems are summarized. The largest part is devoted to the description of the most used bearings and lubricants. The thesis concludes with the design of suitable bearings and their lubrication for the satellite reaction wheel.

KEYWORDS

rolling bearings, lubricant, elastohydrodynamic lubrication, space, satellite

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAVŘÍK, Petr. *Ložiska ve vesmíru* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132250>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. David Košťál, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za vedení práce, cenné rady a odbornou pomoc s jejím vypracováním. Také bych tímto rád poděkoval své rodině za podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	14
2.1	Analýza problému	14
2.2	Cíl práce	14
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
3.1	Režimy mazání	15
3.1.1	Hydrodynamické mazání	16
3.1.2	Hydrostatické mazání	16
3.1.3	Elastohydrodynamické mazání	17
3.1.4	Mezní mazání	18
3.1.5	Směšené mazání	19
3.2	Specifika vesmírného prostředí	19
3.2.1	Stav beztláče	19
3.2.2	Vypařování	19
3.2.3	Kondenzace	20
3.2.4	Nedostatek reaktantů	20
3.2.5	Tepelná vodivost	21
3.2.6	Radiace	21
3.2.7	Viskozita	21
3.2.8	Povrchová migrace	22
3.3	Ložiska	24
3.3.1	Druhy valivých ložisek	24
3.3.2	Materiály valivých ložisek	28
3.3.3	Klece valivých ložisek	29
3.3.4	Těsnění a krycí plechy ložisek	30
3.4	Maziva	31
3.5	Tuhá maziva	33
3.5.1	Výhody a nevýhody tuhých maziv	33
3.5.2	Druhy povlaků	33
3.5.3	Laminární tuhá maziva	36
3.5.4	Měkké kovy	38
3.5.5	Polymery a polymerní kompozity	39
3.6	Kapalná maziva	40

3.6.1	Výhody a nevýhody kapalných maziv	40
3.6.2	Silikony	41
3.6.3	Minerální oleje	41
3.6.4	Perfluoropolyethery (PFPE)	42
3.6.5	Syntetické uhlovodíky	44
3.6.6	Estery	46
3.6.7	Křemičité uhlovodíky	46
3.6.8	Aditiva	47
3.7	Plastická maziva	47
4	DISKUZE	50
4.1	Reakční kola	50
4.2	Návrh ložisek	51
4.3	Návrh maziva	53
5	ZÁVĚR	55
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	61
7.1	Seznam zkratk	61
7.2	Seznam symbolů a veličin	61
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	63
9	SEZNAM TABULEK	65

1 ÚVOD

Tribologie je vědecký obor zabývající se procesy tření, opotřebení a mazání. Při vzájemném pohybu dvou nebo více materiálů, popřípadě při interakci materiálu s prostředím, dochází ke vzniku tření a opotřebení. Mezi nejdůležitější součásti, u kterých se uplatňuje tribologie patří ložiska, ozubená kola a šrouby. Pokud by třecí síly byly příliš vysoké, mohlo by u těchto komponent dojít ke ztrátě přesnosti, a nakonec i funkčnosti.

Velmi vysoké nároky jsou kladeny na ložiska pro vesmírnou aplikaci. Pokud selžou mechanismy kosmických lodí, obvykle neexistují žádné prostředky k nápravě poškození nebo k výměně mazání. Kromě toho, pokud je dotýčný mechanismus zásadní pro provoz kosmické lodi (např. polohovací systémy solárních panelů, zaměřovací mechanismy antén), může závada způsobit předčasné ukončení mise.

Na počátku vesmírného programu nebyly na ložiska a maziva kladeny příliš velké nároky, protože předpokládaná délka misí a pracovní cykly mechanismů byly minimální. Když se délka misí prodloužila, před tribologickými systémy došlo k selhání jiných součástí kosmické lodi, jako byly baterie, elektronika a počítače. V 90. letech však byly tyto součásti výrazně vylepšeny a tribologické systémy se staly limitujícím faktorem spolehlivosti a výkonu kosmické lodi. Ačkoli tribologické systémy představují jen malý zlomek nákladů kosmické lodi, často jde o selhání, která mohou způsobit, že se drahý satelit stane naprosto nepoužitelným.

V současné době se životnost vesmírných satelitů pohybuje okolo 10–20 let, což přináší vysoké nároky na mazivo. Správnou volbu mazacího systému ovlivňuje mimo jiné nepříznivé vesmírné prostředí s mnoha negativními prvky. Pomocí testerů simulujících kosmické podmínky jsou prováděny pozemní zkoušky se snahou určit co nejpřesněji životnost a spolehlivost komponentech kosmických lodí. Tato práce se bude zabývat možnostmi, které lze uplatnit při návrhu ložisek a jejich mazání pro tuto komplexní aplikaci.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

V případě vesmíru nám správný chod ložisek a maziv ovlivňují faktory jako nulové gravitační zrychlení, velmi nízký tlak a teplota, absence reaktivních plynů nebo třeba radiační prostředí. Zásadní vliv mají na maziva, jejichž vlastnosti se můžou výrazně odlišit od pozemských vlastností. Nízká teplota zvýší viskozitu kapalného maziva a tím zvýší její koeficient tření. Tlak blízký nule výrazně zrychlí vypařování, přičemž úbytek maziva může vést až k zadření ložiska. Navíc nám ve vakuu vznikají nové problémy, se kterými se v atmosféře Země nesetkáváme. Jedná se například o degradaci některých syntetických olejů v režimu mezního mazání.

Na samotné ložiska nemá kosmické prostředí tak velký vliv jako na maziva, i když je třeba mít na paměti některé okolnosti. Vlivem absence gravitačního zrychlení odpadá hmotnost působící na ložiska z podpěr. Důležité je zvolit správný typ ložiska v závislosti na aplikaci. Materiál ložisek by měl být pevný, houževnatý a odolný proti mnoha vlivům. Také je potřeba zamezit migraci maziva z ložiska a přímému styku radiace s mazivem a jeho následnou degradaci.

2.2 Cíl práce

Práce má za cíl zmapovat problematiku výběru vhodné tribologické soustavy ložisek a jejich mazání v nepříznivém kosmickém prostředí. Práce poukáže na faktory, které nám odlišují chod ložisek v kosmu oproti pozemskému použití. Hlavní pozornost bude věnována mazivům, která byla v historii použita ve vesmíru nebo jejich vhodnost byla zjištěna na základě pozemských experimentů. Nejpodrobněji budou probrána maziva kapalná a tuhá. S mazivy souvisí i vhodná volba ložisek. Na závěr práce proběhne návrh ložisek a mazání pro reakční kolo satelitu na základě vytvořené rešerše.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

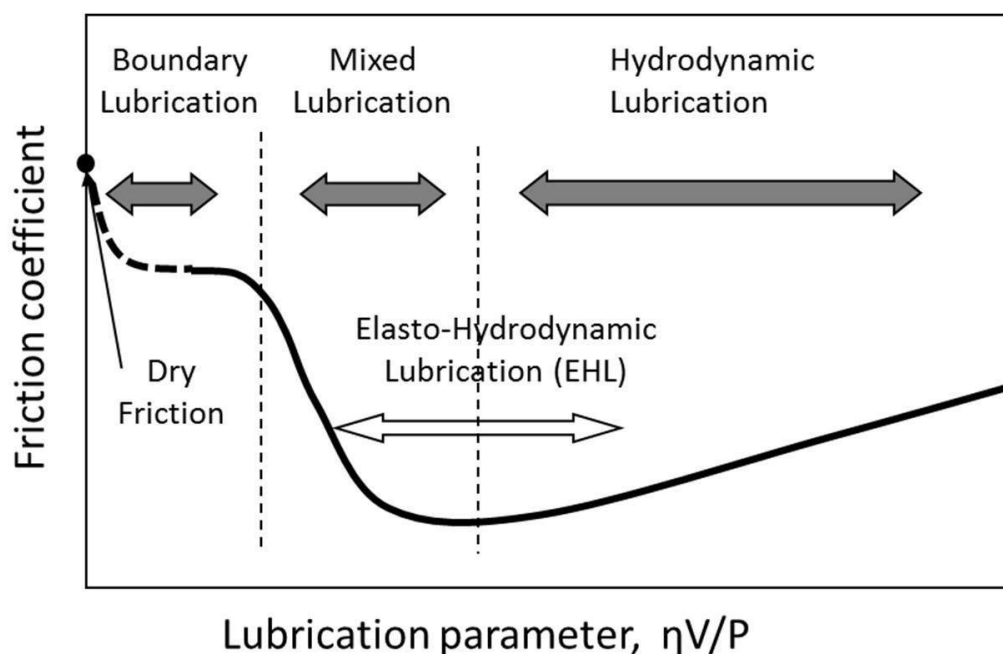
3.1 Režimy mazání

Jednou z nejdůležitějších úloh mazání je oddělit povrchy v relativním pohybu použitím maziva, které má nízký odpor proti smyku, proto aby tyto povrchy neutrpěly vážné poškození nebo opotřebení. Existují různé mazací materiály v různých formách jako jsou kapaliny, plyny a pevné látky. [1]

V závislosti na typu maziva a tloušťce mazacího filmu lze identifikovat několik různých režimů mazání. Jedním ze způsobů zobrazení těchto režimů je Stribeckova křivka. Richard Stribeck provedl na počátku 20. století řadu pokusů s ložisky, na jejichž základě změřil koeficient tření v závislosti na zatížení, rychlosti a teploty. Mayo D. Hersey v roce 1914 provedl podobné experimenty a zavedl formát vykreslování založený na bezrozměrném parametru zvaném Herseyovo číslo

$$\text{Herseyovo číslo} = \frac{\eta \cdot \omega}{p}$$

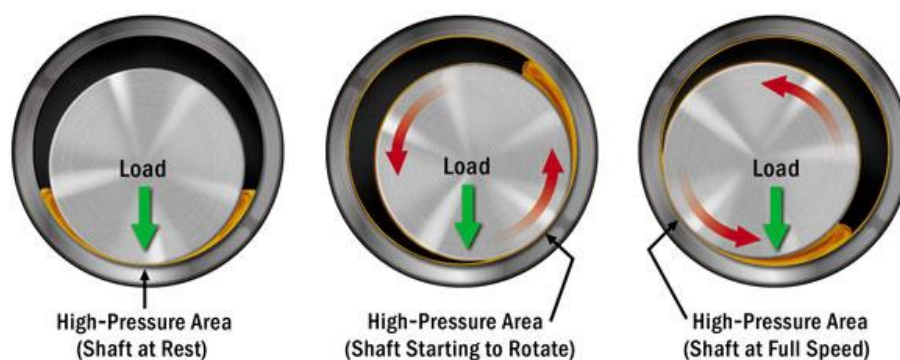
kde η je dynamická viskozita maziva, ω je úhlová rychlost ložiska a p je zatížení ložiska. Výsledná Stribeckova křivka udává závislost mezi koeficientem tření f a Herseyovým číslem (viz Graf 3-1). Rozeznáváme čtyři základní režimy: mezní mazání, smíšené mazání, elastohydrodynamické mazání a hydrodynamické mazání. [1] [2]



Graf 3-1 Stribeckova křivka [3]

3.1.1 Hydrodynamické mazání

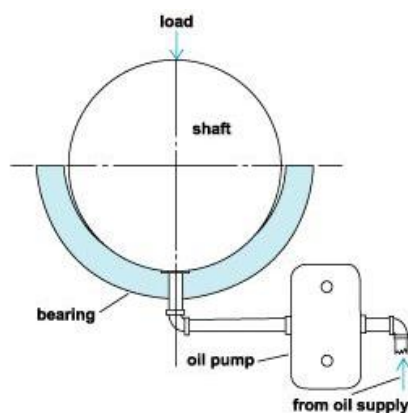
Při vysoké hodnotě Herseyova čísla, která nastane při vysoké úhlové rychlosti, vysoké dynamické viskozitě a nízkém zatížení, jsou povrchy zcela odděleny silným ($> 0,25 \mu\text{m}$) mazacím filmem, který je podstatně silnější než rozměry povrchových nerovností. Povrchy v relativním pohybu jsou zcela odděleny a tření je dáno reologií maziva. Jedná se o hydrodynamické mazání, kdy vlivem relativního pohybu kontaktních ploch vzniká tlak, který unáší mazivo do zúženého prostoru, ve kterém vzniká klínová vrstva maziva (Obr. 3-1). Hydrodynamické mazání probíhá na všech konformních površích jako jsou např. kluzná ložiska. [4] [1]



Obr. 3-1 Hydrodynamické mazání [5]

3.1.2 Hydrostatické mazání

Hydrostatické mazání je v podstatě forma hydrodynamického mazání, při níž jsou povrchy zcela odděleny filmem maziva, ale místo toho, aby se film generoval vlivem relativního pohybu, je tlak dodáván externím olejovým čerpadlem (viz Obr. 3-2). Hydrostatické mazání závisí na vstupním tlaku mazacího oleje a vůli mezi povrchy. Tento režim mazání může být výhodný u ložisek s velmi malou až nulovou rychlostí. [6]

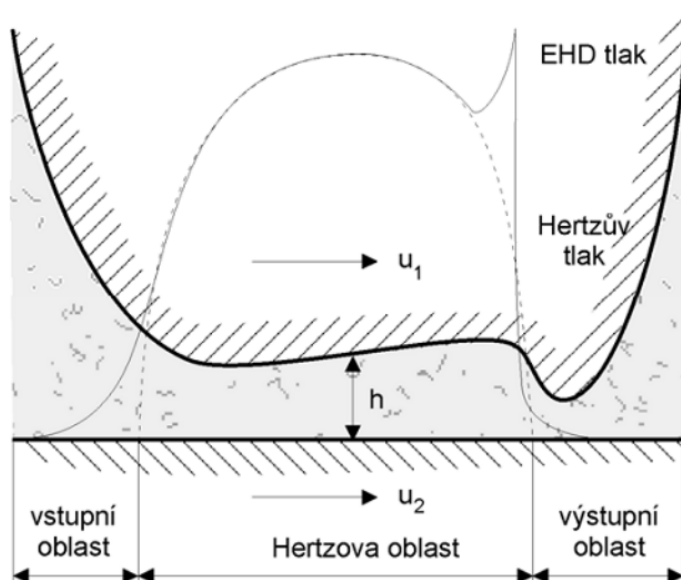


Obr. 3-2 Hydrostatické mazání [7]

3.1.3 Elastohydrodynamické mazání

Jiná forma hydrodynamického mazání se vyskytuje u nekonformních povrchů u součástí jako jsou ozubená kola a valivá ložiska. Nazývá se elastohydrodynamické (EHD) mazání. U tohoto typu komponent jsou zatížení velmi vysoká a působí na relativně malých plochách, takže generované kontaktní tlaky jsou řádově vyšší než u kluzných ložisek. Takto vysoké tlaky mohou vyvolat změny viskozity maziva a způsobit pružnou deformaci dotýkajících se těles (viz Obr. 3-3). Kombinace těchto účinků umožňuje vytvoření mazacího filmu plně oddělujícího plochy komponent. [4] [1]

Místo vzniku elastohydrodynamického mazání se dá rozdělit na tři podoblasti. Malá, ale důležitá konvergentní vstupní oblast, ve které jsou generovány potřebné počáteční tlaky maziva, určuje tloušťku filmu v hlavní oblasti. Ta je nazývána Hertzovou oblastí, protože kontaktní tlak je zde blízký Hertzovu tlaku a film je rovnoběžný. Na výstupní straně, kde tlak klesá k nule, dochází ke ztenčení tloušťky filmu. Tloušťka filmu v zúžení je přibližně 90–85 % jeho hodnoty v hlavní oblasti. [4] [8]



Obr. 3-3 EHD mazání [9]

Dvě fyzikální veličiny maziva, které ovlivňují tvorbu EHD filmu, jsou dynamická viskozita η a tlakově viskózní koeficient α . Závislost viskozity a tlaku nám udává Barova rovnice

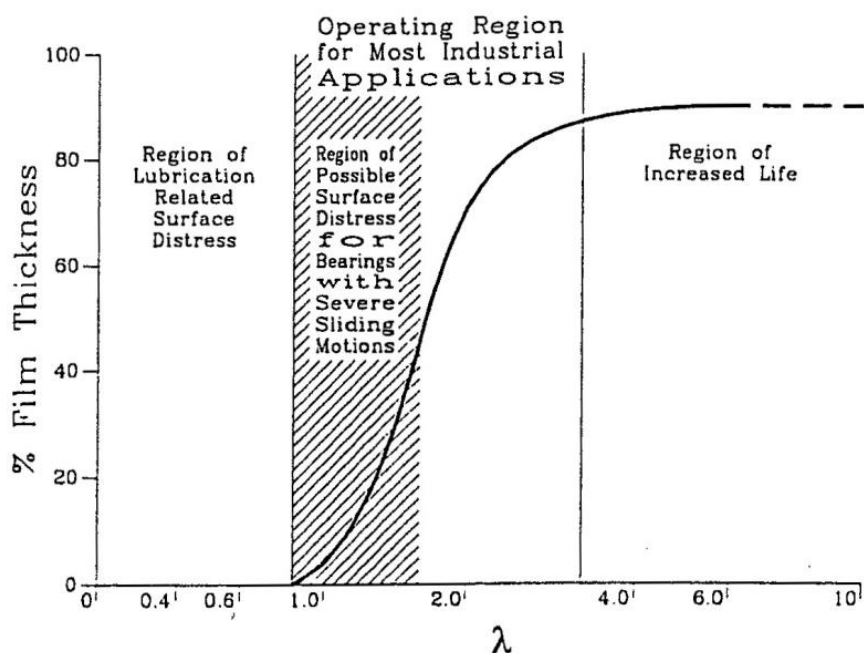
$$\eta_p = \eta_0 \cdot e^{\alpha \cdot p}$$

kde η_p je dynamická viskozita při tlaku p , η_0 je dynamická viskozita při atmosférickém tlaku a p je působící tlak. Viskozita je ovlivněna jak molární hmotností, tak chemickou strukturou, zatímco hodnoty α souvisejí pouze s chemickou strukturou. Výjimkou jsou kapaliny s velmi nízkou molární hmotností. [10] [1]

Pro určení minimální tloušťky filmu se používá parametr λ . Ten udává poměr mezi minimální tloušťkou mazacího filmu h_{min} a drsností povrchu ložiskových ploch R_{a1} a valivých těles R_{a2} .

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}$$

Režim EHD je charakterizován hodnotou parametru λ v rozmezí 3–10, což odpovídá tloušťce filmu mezi 0,1–1 μm . S klesající lambdou se tření zvyšuje. Pokud by parametr klesl pod hodnotu 3, nastalo by smíšené mazání. Rozhraní mezi smíšeným a mezním režimem se obvykle uvažuje na hodnotě 0,8. Závislost parametru λ na tloušťce filmu lze vidět na grafu Graf 3-2. [4]



Graf 3-2 Závislost λ na procentuální tloušťce filmu [4]

3.1.4 Mezní mazání

Při nízkých hodnotách Herseyova čísla dochází ke vzniku mezního mazání. Povrchy jsou od sebe odděleny velmi tenkým mazacím filmem o tloušťce pouhých několika molekul. Mezi kontaktními povrchy dochází k vzájemnému styku na výčnělcích nerovností. Nejdůležitějším aspektem tohoto režimu je tvorba ochranných povrchových vrstev, které minimalizují opotřebení a poškození povrchu. Tvorba těchto vrstev se řídí chemickým složením jak mazacího filmu, tak i kontaktních povrchů. V režimu mezního mazání pracují u kosmických aplikací mechanismy s velmi nízkými otáčkami. Jedná se například o skenovací a polohovací mechanismy, mechanismy pro natočení solárních panelů atd. [1]

3.1.5 Smíšené mazání

Při smíšeném mazání dochází k přerušovanému kontaktu mezi třecími plochami v několika málo vysokých povrchových bodech. Smíšené mazání je přechodný režim mezi mazáním mezním a hydrodynamickým.

3.2 Specifika vesmírného prostředí

3.2.1 Stav beztláče

Jedna z mála výhod provozu ve vesmíru je absence gravitačního zrychlení. Eliminace hmotnosti působící na ložiska z jeho podpěr minimalizuje opotřebení ložisek a snižuje pravděpodobnost únavy valivých těles. Na druhou stranu odpadá možnost použití zásobníků s mazivem závislých na gravitačních silách. [11]

3.2.2 Vypařování

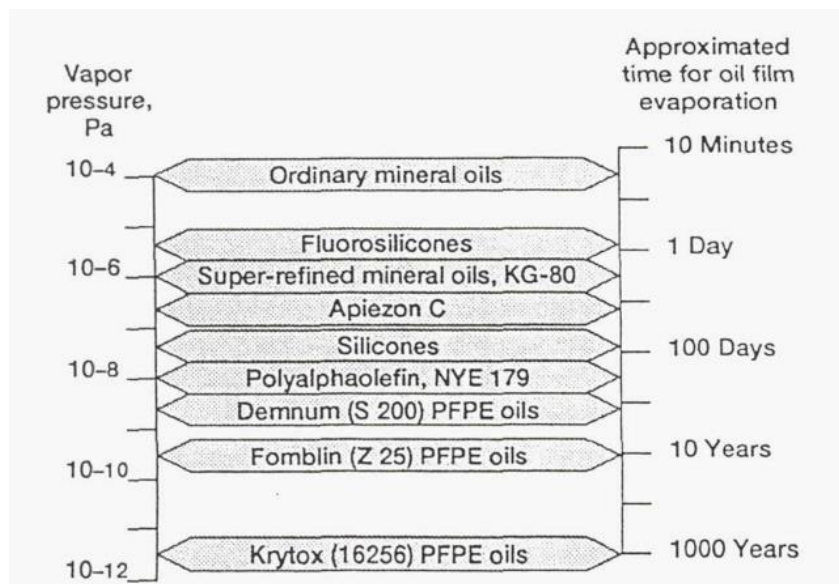
Jedná se o skupenskou přeměnu, při které se kapalné látky mění na látky plynné. Množství molekul, které se vypaří z daného materiálu, závisí na okolním tlaku, teplotě, velikosti povrchu a proudění. Absolutní tlak mimo atmosféru Země se pohybuje okolo 10^{-13} mbar, v uzavřených prostorách satelitů a vesmírných stanic se ustálí na hodnotě okolo 10^{-7} mbar [11]. Látky se vypařují za jakékoliv teploty a tlaku, avšak takto nízký tlak výrazně zrychlí vypařování. V případě pevných látek se tato skupenská přeměna nazývá sublimace, ale v porovnání s kapalnými látkami je rychlost zanedbatelně malá.

Rychlost vypařování W je definována jako úbytek hmotnosti na jednotce plochy za jednotku času. Pro kapaliny se zjišťuje z rovnice:

$$W = C \cdot p \cdot \left(\frac{M}{T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Kde C je konstanta, p je tlak par látky, M je molární hmotnost látky a T je termodynamická teplota. Tlak par je jednou ze základních veličin u kapalných maziv, která rozhoduje o vhodnosti použití maziva ve vesmíru. Tato veličina nám říká, při jak nízkém tlaku může ještě látka existovat v kapalném nebo pevném stavu za dané teploty. Zvyšováním teploty se zvyšuje tlak par, a tím i rychlost vypařování. Mazivo, které je rozprostřeno v tenké vrstvě na povrchu součásti, se odpařuje rychleji než stejný objem uzavřený v zásobníku. [4]

U většiny dnešních satelitních systémů nebylo vypařování vážným problémem. V současnosti je k dispozici řada maziv s nízkým tlakem par. Tlaky par při pokojové teplotě používaných kosmických maziv a jejich průměrný čas, kdy dojde ke ztrátě 10 μm z tloušťky filmu, můžeme vidět na obrázku Obr. 3-4. Dále existují velmi jednoduché způsoby těsnění, jako jsou labyrintová těsnění nebo třeba krycí plechy kuličkových ložisek. [12]



Obr. 3-4 Tlaky par a průměrné časy úbytku 10 μm filmu při 20 °C běžně používaných kapalných maziv ve vesmíru [12]

3.2.3 Kondenzace

Při vypařování maziva má materiál tendenci se shlukovat do mračka kolem satelitu, místo toho, aby se rozplynul ve vesmíru. V mnoha případech poté kondenzuje na chladných površích satelitu v podobě tenkého filmu. Důležité povrchy satelitu, jako jsou snímače, zrcadla, čočky, mřížkové spektrografy a další, se mohou stát nepoužitelnými při zakrytí citlivých částí vrstvou zkondenzovaného maziva. Podobně jako u vypařování, se dá problémům vyhnout vhodnou volbou maziva nebo pečlivým utěsněním problémových částí. [12]

3.2.4 Nedostatek reaktantů

Absence reaktivních plynů, zejména molekulárního kyslíku, v kosmickém prostředí je důležitým hlediskem pro mazání mechanických součástí. Je dobře známo, že při absenci povrchových oxidačních filmů mohou být koeficienty tření kovů klouzajících po nemazaných kovech velmi vysoké. V extrémních případech může dojít až k úplnému svaření povrchů. Problémům se dá zamezit správnou volbou materiálu ložisek a maziva. [11] [12]

3.2.5 Tepelná vodivost

Při absenci gravitace nedochází k ochlazování v důsledku přirozené konvekce. Třecí kontakty velmi často probíhají na velmi malých plochách a vytvářejí velké množství tepla. Neschopnost odvádět teplo z těchto malých kontaktních ploch může vést k ještě vyšším místním teplotám a poté i k degradaci maziva. Problém může být závažnější u tuhých maziv než u kapalných, protože kapalná maziva mají dobrou tepelnou vodivost a dokážou odvádět nahromaděné teplo. Pokud je však množství kapalného maziva malé nebo pokud nemůže volně cirkulovat, může být chování prakticky stejné jako u pevných maziv. [12]

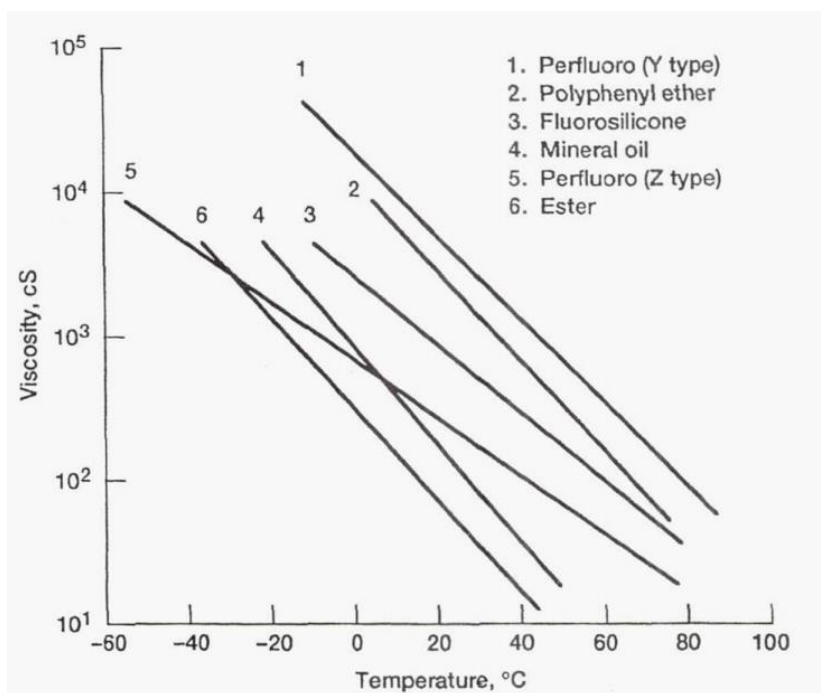
3.2.6 Radiace

Radiaci ve vesmíru lze rozdělit na záření elektromagnetické a záření elementárních částic. Elektromagnetické záření zahrnuje viditelné světlo, infračervené, ultrafialové, rentgenové a gama záření. Ultrafialové a rentgenové záření mohou nejvíce poškodit organické materiály, u kterých vlivem ionizace může dojít ke zvýšení reaktivity. Působením infračerveného záření může mazivo v ložiskách tepelně degradovat. Naštěstí ložiska bývají ukryta a utěsněna, tudíž vesmírné záření nezpůsobuje závažné problémy. [11] [12]

3.2.7 Viskozita

Viskozita se dá charakterizovat jako odpor, který kladou dvě sousední vrstvy kapaliny při vzájemném pohybu. Rozeznáváme dva druhy viskozity. Dynamická viskozita η a kinematická viskozita ν , která je definována jako poměr dynamické viskozity a hustoty kapaliny. Kinematickou viskozitu lze snadno experimentálně určit s velkou přesností a je proto upřednostňována pro charakterizaci maziv. Viskozita maziva má dopad na řadu parametrů. Zvýšením viskozity například docílíme zvýšení tření v ložisku. Výhodou zvýšení viskozity je generování elastohydrodynamického mazání i při nižších otáčkách ložiska. Kapaliny s vyšší viskozitou mají nižší tlak par. [13]

Zásadní vliv na viskozitu má teplota. Na grafu Graf 3-3 lze vidět závislost viskozity na teplotě pro vybraná maziva. Lze pozorovat, že se zvyšující se teplotou nám viskozita klesá. Tuto závislost nám popisuje viskozitní index. Čím je viskozitní index kapaliny nižší, tím více je viskozita ovlivněna teplotou. Teplotní výkyvy panující u satelitů mohou mít za následek narušení správného chodu maziva a zkrácení tak životnosti ložisek. Je proto důležité zvolit mazivo s co nejvyšším viskozitním indexem k zajištění stabilního chodu. [13] [12]

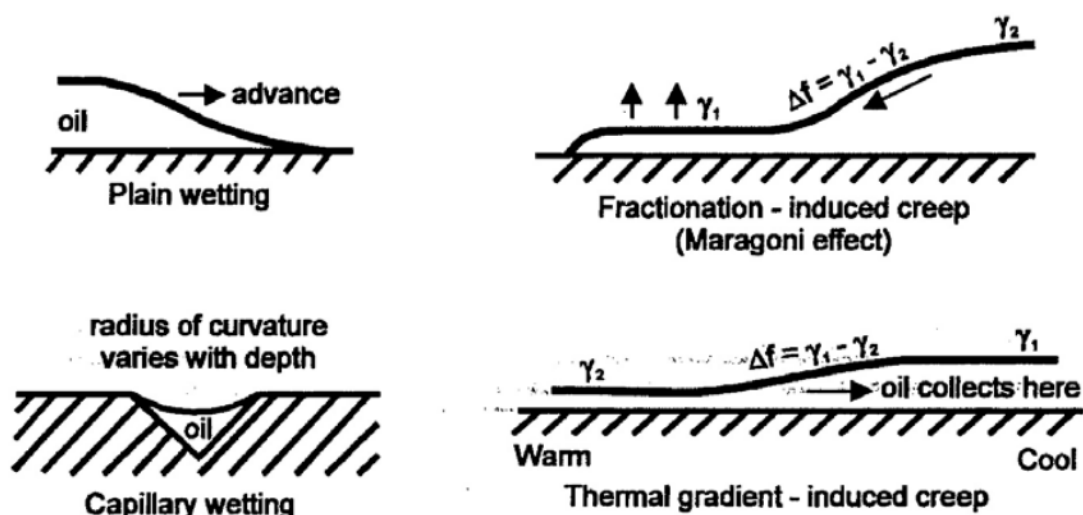


Graf 3-3 Závislost viskozity na teplotě maziv [12]

Druhou důležitou závislostí je závislost viskozity na tlaku. Se zvyšujícím se tlakem viskozita kapalin roste. V místě kontaktu valivého tělíska s kroužkem ložiska vzniká velmi vysoký tlak a mazací olej zde může spíše vykazovat charakteristiky pevného tělesa než tekutiny. Tuto závislost nám popisuje tlakově viskózní koeficient α a hraje významnou roli při určování tloušťky mazacího filmu v režimu EHD mazání. Z teorie EHD mazání vyplývá, že mazivo s největší hodnotou α by mělo poskytovat nejtlustší film. [14]

3.2.8 Povrchová migrace

Kromě vypařování může ke ztrátě maziva docházet i vlivem povrchové migrace. V nepřítomnosti adsorbované vodní vrstvy na povrchu ložiska může mazivo vykazovat zvýšenou povrchovou migraci. Maziva s vyšší viskozitou mají menší tendenci k migraci než maziva s nižší viskozitou. Typy povrchové migrace lze pozorovat na obrázku Obr. 3-5. Jedná se o prosté smáčení, migraci vyvolanou frakcionací, kapilární smáčení a migrace vyvolaná tepelným gradientem. [15]



Obr. 3-5 Typy povrchové migrace olejů na površích [15]

U prostého smáčení mazivo smáčí povrch součásti a roztírá se po povrchu. Nastává, když je povrchové napětí kapaliny nižší než povrchová energie pevné látky. K migraci vyvolané frakcionací dochází, když se mazivo skládá ze směsi látek s podobnou chemickou strukturou, ale různou molární hmotností. Lehčí složky mají často nižší povrchové napětí než těžší složky a tečou rychleji, takže zbytkové mazivo je ochuzeno o lehčí složky. [4]

Ke kapilárnímu smáčení dochází při existenci nedokonalostí povrchu. Může se jednat o stopy po obrábění, škrábance, důlky atd. Tyto nedokonalosti vedou k proudění maziva mimo místo jeho určení. Kapilární smáčení může být významným mechanismem ztráty maziva z kontaktní zóny. Tepelným gradientem vyvolaná povrchová migrace se projevuje tečením kapaliny z teplé zóny do chladnější, což vede k úbytku tloušťky filmu v teplé zóně. Způsobeno teplotně indukovanými změnami povrchového napětí. [4]

Vhodnou úpravou povrchu v závislosti na typu migrace lze povrchové migraci předejít. Migraci vyvolanou tepelným gradientem lze zamezit, pokud bude drsnost povrchu $0,6 \mu\text{m}$ nebo větší. Na druhou stranu u kapilární migrace pomůže snížení drsnosti na hodnotu $0,1 \mu\text{m}$ nebo menší [4]. Druhou a používanější metodou je vytvoření bariéry. Tenká fluorokarbonová vrstva se nanese na povrch součásti tak, aby zcela obklopila oblast, v níž má být mazivo uzavřeno. Povrchová energie bariéry musí být nižší než povrchové napětí maziva, aby mazivo nemohlo smáčet povrch bariéry. [15]

3.3 Ložiska

Kosmické lodě a satelity obsahují řadu mechanismů, které vyžadují vhodná ložiska. Jedná se výhradně o pohony solárních panelů, momentové a reakční kola, sledovací antény, skenovací zařízení, různé gyroskopy a senzory. Každé z těchto zařízení má jedinečné požadavky na ložiska a mazání. Nejpoužívanější jsou ložiska valivá, kluzná ložiska mají pro vesmír minimální využití. [1]

3.3.1 Druhy valivých ložisek

Radiální kuličková ložiska

Radiální kuličková ložiska jsou nejběžnějším typem ložisek a jsou navržena převážně k přenosu radiálního zatížení. Mohou pojmout omezená axiální zatížení. Jsou optimalizovány pro nízkou hlučnost a nízké vibrace, což umožňuje vysoké rychlosti otáčení. U ložisek mazaných oleji se používají nýtované klece nebo fenolické masivní korunky. U ložisek se suchým mazáním by měla být použita samomazná korunka, nejčastěji z Duroidu nebo Rulonu při mazání MoS_2 nebo PTFE povlaky. Není vhodné použít klece z olovnatého bronzu kvůli nízké elasticitě. Radiální kuličková ložiska jsou nejvhodnější pro aplikace, kde je potřeba vysoké radiální tuhosti při nízkých nebo nulových axiálních zatíženích. [16] [4]

Naklápěcí kuličková ložiska

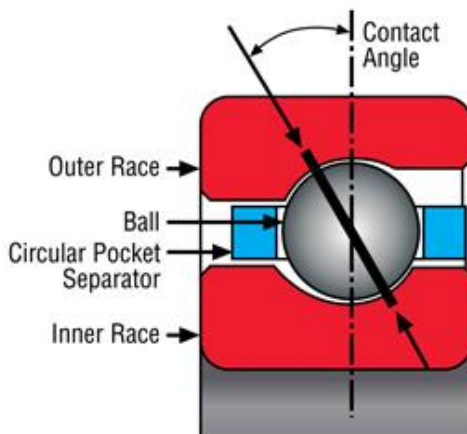
Jedná se o dvouřadá kuličková ložiska s dvěma drážkovými dráhami pro kuličky na vnitřním kroužku. Oproti ostatním ložiskům se odlišuje kulovou dráhou na vnějším kroužku, což dovoluje naklápění vnitřního kroužku s kuličkami vedenými v kleci. Pro aplikace, kde nastává problém seřizení hřídele a ložiska, popřípadě kde by mohlo dojít k jejich následnému vyosení v provozu. Vhodné pro velmi vysoké radiální zatížení. [16]



Obr. 3-6 Naklápěcí kuličkové ložisko [17]

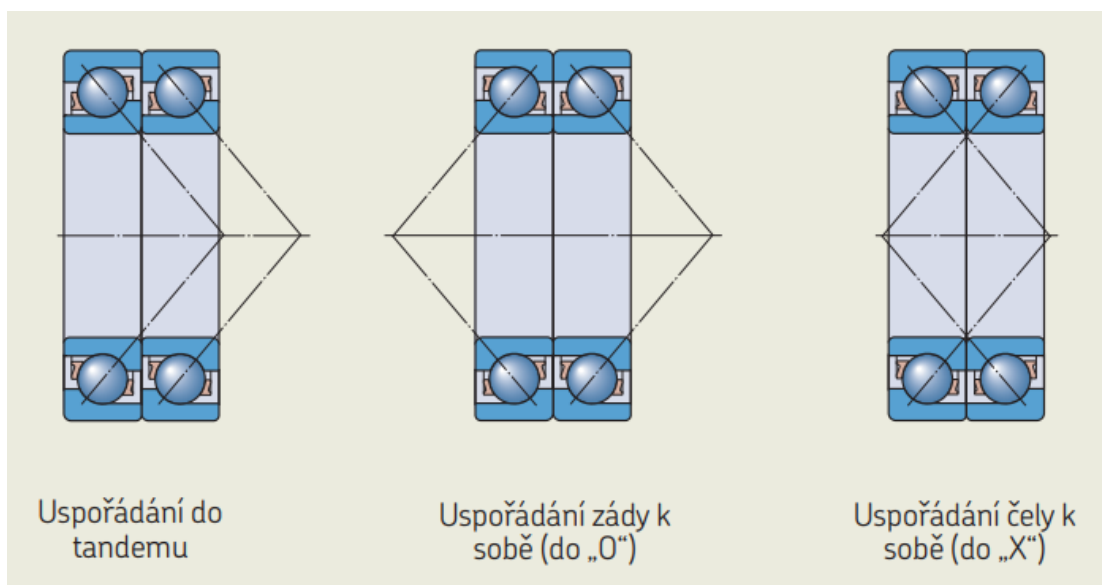
Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem

Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem mají oběžné dráhy vnitřních a vnějších kroužků vzájemně vůči sobě přesazeny ve směru osy ložiska. Tato ložiska jsou tedy vhodná pro přenášení současně působících radiálních a axiálních zatížení. Axiální únosnost těchto ložisek vzrůstá s rostoucím stykovým úhlem. Stykový úhel je definován jako úhel, který svírá spojnice stykových bodů tělíska a oběžných drah v radiální rovině, po níž je přenášeno kombinované zatížení z jedné dráhy na druhou, s kolmicí k ose ložiska (viz Obr. 3-7). [16]



Obr. 3-7 Stykový úhel kuličkového ložiska s kosoúhlým stykem [18]

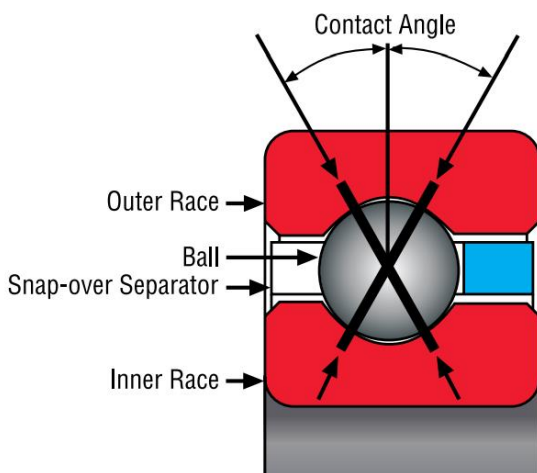
Díky své kompaktnosti, vysoké přesnosti a nastavitelné tuhosti se jedná o velmi rozšířená ložiska ve vesmíru. Standardní je duplexní použití. Duplexní páry mohou pojmout axiální zatížení v obou směrech. Jsou uspořádány buď v konfiguraci zády k sobě (do „O“) nebo čely k sobě (do „X“). Uspořádání do „X“ je méně citlivé na nesouosost, ale současně méně tuhé než uspořádání do „O“. Tandemová uspořádání se v kosmických lodích používají jen zřídka. [4] [16]



Obr. 3-8 Způsoby montáže dvojic ložisek [16]

Čtyřbodová kuličková ložiska

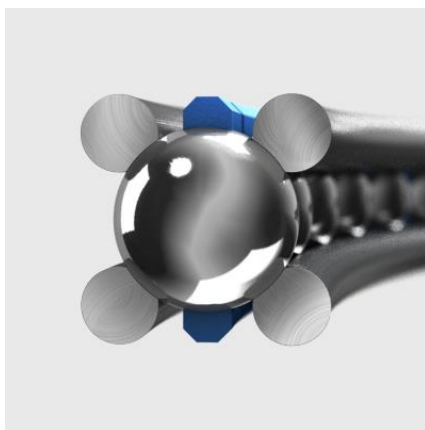
Jedná se o radiální jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem, u kterých oběžné dráhy mají dva poloměry, jejichž středy jsou odsazeny od roviny středů kuliček. Každý poloměr je o něco větší než poloměr kuličky. Tato výsledná „klenutá“ geometrie má za následek čtyřbodový kontakt mezi kuličkou a oběžnou dráhou. Díky tomu ložisko může zachycovat axiální sílu v obou směrech a je dosaženo vysoké radiální, axiální i momentové tuhosti. Odpadá tedy potřeba použití druhého ložiska, což poskytuje ušetření místa, váhy a nákladů. Používají se primárně pro aplikace s nízkou až střední rychlostí nebo tam, kde převažuje oscilační pohyb. [19]



Obr. 3-9 Čtyřbodové kuličkové ložisko [19]

Drátové ložisko

Tam, kde je zásadní úspora hmotnosti v kombinaci s nižšími požadavky na přesnost, lze použít drátové ložiska. V podstatě jsou konvenční oběžné dráhy ložiska nahrazeny čtyřmi kalenými pružinami nebo dráty z nerezové oceli. Dráty jsou zpracované tak, aby byly konformní s ohledem na kouli, a jsou umístěny v rozích pouzdra ložiska. Celková nižší přesnost drátěných ložisek omezuje jejich použití v mechanismech kosmických lodí. [4]



Obr. 3-10 Drátové ložisko [20]

Axiální kuličkové ložisko

Vhodné pro aplikace, kde působí čistě axiální zatížení a nevzniká radiální zatížení. Pro vesmírné aplikace je vhodné použít tyto ložiska mazaná tuhým mazivem společně s klecí vedenou valivými tělisky. Bohužel mají jen minimální využití ve vesmíru. [4]

Ložiska s čárovým stykem

Válečková ložiska se používají pro aplikace vyžadující mimořádně velká radiální zatížení. Mají vyšší radiální tuhost než kuličková ložiska srovnatelné velikosti, ale vyžadují větší péči při montáži a na přesnost seřízení. Nabízejí nižší rychlosti než ložiska kuličková kvůli vyššímu tření způsobenému čárovým stykem. [4]

Kuželíková tělesa dokážou díky stykovému úhlu absorbovat vysoké radiální a axiální zatížení v jednom směru. Jedná se tak o vysoce únosnou alternativu ke kuličkovým ložiskům s kosoúhlým stykem. Jsou však vysoce citlivá na tepelné namáhání a lze očekávat velké změny krouťacího momentu, pokud jsou ložiska za provozu vystavena teplotním výkyvům. [4]

Jehlové ložisko je speciální druh válečkového ložiska, u kterého mají válečky podstatně větší délku než průměr. Používají se v aplikacích, kde je nedostatek radiálního prostoru a zároveň je potřeba velké únosnosti. Občas je vnitřní kroužek obětován a jehly přiléhají přímo ke hřídeli. Jednoduchá jehlová ložiska nemohou přenášet axiální zatížení. V současnosti se jedná o nejpoužívanější typ ložisek s čárovým stykem u vesmírných aplikací, výhradně u mechanismů pro rozvinutí antén a solárních panelů. [4]



Obr. 3-11 Jehlové ložisko [21]

3.3.2 Materiály valivých ložisek

Výběr správného materiálu pro ložiska je stejně důležitý jako výběr správného maziva. Jednoduše řečeno, nesprávná volba materiálu může vést k předčasnému selhání bez ohledu na volbu maziva. Chemické vlastnosti materiálu mohou způsobit rozpad maziva v kluzných podmínkách nebo mohou bránit tvorbě mazacích filmů nezbytných pro odpovídající režim mazání. Důležité jsou také fyzikální vlastnosti. Musí mít potřebnou pevnost a dobré vlastnosti v tahu a tlaku. [12]

Vhodnými kandidáty pro materiál ložisek u vesmírných aplikací jsou vysokopevnostní oceli, jejichž pevnost v tahu by měla být vyšší jak 1000 MPa. Tyto oceli nabízejí kombinaci velmi vysoké pevnosti, dobré tažnosti a lomové houževnatosti a používají se v aplikacích, kde má zásadní význam snížení hmotnosti. Precipitačním vytvrzováním lze u těchto ocelí dále zvýšit pevnost a odolnost proti korozi. [22]

Kalené a popouštěné oceli vděčí za své vysoké pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti opotřebení tvorbě metalografické fáze zvané martenzit. Martenzit je křehký a musí být temperován, aby se zlepšila jeho tažnost a houževnatost u většiny technických aplikací. [22] Dvě nejčastěji specifikované kalené a popouštěné oceli pro tribologické aplikace v kosmických lodích jsou AISI 440C a AISI 52100. Tyto materiály se téměř vždy používají pro valivá ložiska [4]. Vybrané materiály valivých ložisek vhodné do kosmického prostředí a jejich vlastnosti lze vidět v tabulce Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Materiály valivých ložisek pro vesmírné aplikace [4]

Materiál	Typ	Tvrdost (HRC)	Odolnost proti korozi	Maximální provozní teplota (°C)
AISI 52100	prokalitelná ocel 1 %C; 1,45 %Cr	59–64	Špatná	150
AISI 440C	martenzitická ocel 1 %C; 17 %Cr	58	Normální	240
AISI M50	nástrojová ocel 0,8 %C; 4 %Cr 4,25 %Mo; 1 %V	64	Špatná	370–430
Nitrid křemíku	izostaticky lisováno za tepla	78	Dobrá	1200

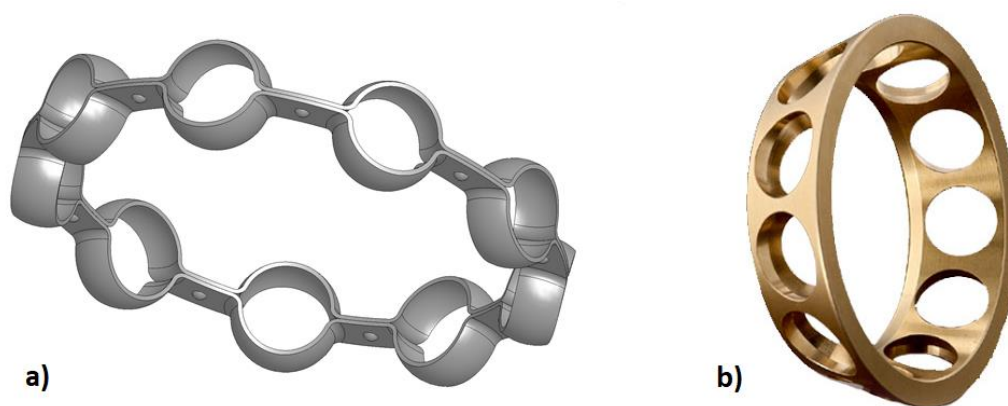
Ocel AISI 52100 se používá hlavně ve vytvrzeném a lehce popouštěném stavu u dílů vyžadujících vysokou povrchovou tvrdost s hlubší kalenou vrstvou než jaké lze dosáhnout u cementovaných ocelí. Je možné kalit buď v oleji do průměrů 250 mm nebo kalit vodou u větších rozměrů, aby vznikl velmi tvrdý povrch odolný vůči opotřebení. Typická použití zahrnují kuličková a válečková ložiska, čepy nástrojů a vřetena. Špatná odolnost proti korozi. [22]

AISI 440C je kalitelná nerezová ocel s vysokým obsahem chromu pro univerzální využití. Má dobrou pevnost a odolnost proti opotřebení. Tato ocel se vždy používá ve vytvrzeném stavu. Korozi vlastnosti jsou však v plně vytvrzeném stavu zhoršeny. Ocel je magnetická. [22]

3.3.3 Klece valivých ložisek

Klec ve valivém ložisku plní následující úlohy. Rozděluje valivá tělesa rovnoměrně po obvodu a zabraňuje jejich vzájemnému styku a tím se snižuje tření v ložisku. Brání prokluzu valivých tělísek v ložisku a zamezuje jejich vypadnutí z rozebíratelných ložisek při jejich montáži. U kosmických lodí může také fungovat jako zdroj maziva nebo jako zásobník pro jeho doplnění. [23]

Dva základní typy klecí z hlediska konstrukce a materiálů jsou lisované a masivní. Lisované klece se vyrábějí převážně lisováním z ocelového nebo mosazného plechu a většinou se používají v rozměrově menších až středních ložiscích. Jejich předností oproti masivním klecím je menší hmotnost. Masivní klece se vyrábějí z oceli, mosazi, bronzu, lehkých kovů nebo z plastů v různém konstrukčním provedení. Kovové materiály klecí se uplatňují v případech, kdy jsou na pevnost klece kladeny zvýšené nároky a ložisko je určeno pro vyšší provozní teploty. Klece jsou v ložisku radiálně vedeny buď valivými tělisky, což je nejrozšířenější způsob, nebo na nákržku jednoho z ložiskových kroužků. [23]



Obr. 3-12 Druhy klecí valivých ložisek; a) Lisovaná klec [24]; b) Masivní klec [25]

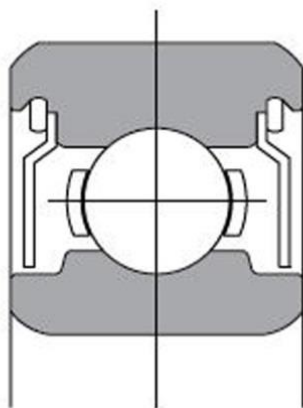
Materiál klece je vybrán na základě strukturálních a tribologických vlastností. Konstrukčně musí být klec dostatečně silná, aby vydržela veškerá potenciální dynamická a statická zatížení, a přesto musí mít minimální hmotnost. Je žádoucí materiál s určitou poddajností, tak aby dokázal absorbovat energii srážek a zajistil stabilní chod. Tribologicky je zapotřebí materiál s nízkým koeficientem tření pro minimalizaci třecích ztrát, a tedy i hluku točivého momentu, které jsou výsledkem interakcí klece s valivými tělísky a s kroužky. Je nutné nízké opotřebení, aby se snížila tvorba znečišťujících částic, jejichž přítomnost také navyšuje hluk točivého momentu. [16]

Při kapalném mazání se v leteckém průmyslu používá mosaz, polyacetal, fenol, porézní polyimid, nerezová ocel a toroidní rozpěrky PTFE. Mosaz by se neměla používat ve vakuu kvůli relativně vysokému tlaku par zinku, ale i tak byly mosazné klece použity v několika kosmických aplikacích. [4]

Pro aplikace se suchým mazáním jsou běžné materiály klecí olovnatý bronz a PTFE (Rulon, Salox, PGM-HT). Olovnatý bronz je dobře tvárný a jako takový není vhodným materiálem pro korunkové klece, protože během montáže se mohou žebra klece plasticky deformovat. Někdy se používají lisované ocelové klece, ale je zde obava, že jakmile dojde k opotřebení klece, odloučené ocelové částice způsobí velké změny točivého momentu a tím i následnou poruchu ložiska. [4]

3.3.4 Těsnění a krycí plechy ložisek

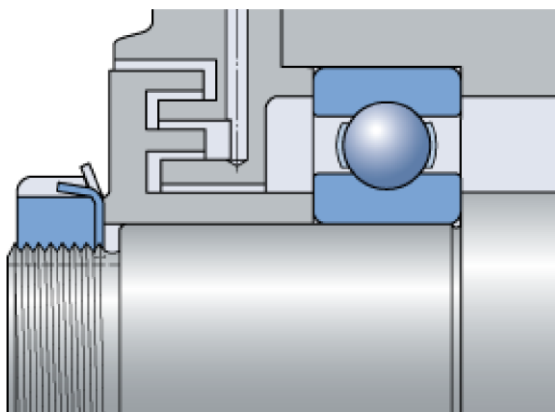
Účelem těsnění a krycích plechů ložiska je udržet mazivo v ložisku a zabránit vniknutí vnějších nečistot. Krycí plechy jsou kovové a nedochází ke kontaktu plechu s vnitřním kroužkem. Těsnění jsou vyrobena z různých elastomerních materiálů a mohou být jak kontaktní, tak i bezkontaktní. U bezkontaktních těsnění a plechů nedochází ke zvýšení kroutícího momentu, avšak poskytují menší ochranu proti kontaminaci a úniku maziva v porovnání s kontaktním těsněním. [26]



Obr. 3-13 Krycí plechy kuličkového ložiska [26]

Volba jednostranného nebo oboustranného utěsnění ložiska závisí na konkrétní aplikaci. Pokud je například mezi ložisky umístěn zásobník kapalného maziva, měly by se ložiska utěsnit jen z vnější strany. Plechy a těsnění se u suchého mazání užívají méně často, utěsněním by totiž došlo k hromadění znečišťujících částic vzniklých opotřebením maziva v ložisku. [4]

Speciálním druhem těsnění je labyrintové těsnění. Jedná se o bezkontaktní těsnění zabráňující migraci maziva u rotačních součástí. Je tvořeno soustavou dlouhých úzkých kanálků mezi mazanou součástí a vnějším mechanismem. Průchod tekutiny touto složitou cestou je navíc ztížen povrchovým napětím. Ideální řešení pro zamezení migrace maziva vlivem vypařování. [27]



Obr. 3-14 Axiální labyrintové těsnění [28]

3.4 Maziva

Mazivo je látka, organická nebo anorganická, sloužící především k vytvoření stálého mazacího filmu mezi třecími povrchy. Mezi hlavní úlohy maziva patří snížení tření, zajištění odvodu tepla z kontaktu, ochrana třecích povrchů proti korozi a ochrana proti vniknutí nečistot do kontaktu. Maziva dělíme na maziva kapalná, plastická, tuhá a plynná. [29]



Obr. 3-15 Mazací olej [30]

Pro vesmírné aplikace jsou nejpoužívanější tuhá a kapalná maziva. Nedá se jednoznačně určit, které mazivo, ať už tuhé nebo kapalné je ideální pro konkrétní aplikaci. Obě třídy mají své výhody a nevýhody. Při volbě nejvhodnějšího maziva musí konstruktér zvážit mnoho faktorů. Existují aplikace, kdy je vhodné použít pouze tuhé nebo kapalné mazivo. Pro tuhá maziva to jsou [4]:

- Provoz při velmi nízkých teplotách, kdy nejnižší bod tuhnutí pro kapalná maziva má mazivo PFPE typu Z a to $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pod tuto teplotu lze pro provoz použít pouze tuhé mazivo.
- Provoz při velmi vysokých teplotách. I přes to, že některé oleje pro vesmírnou aplikaci jsou schopné správně pracovat i do teplot $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, jejich rychlost vypařování při zvýšených teplotách by byla neúnosně vysoká. Obecně by se tyto oleje neměli používat nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Zamezení kontaminace výpary, protože většina tuhých maziv má zanedbatelný tlak par.

Pro kapalná maziva to jsou tyto aplikace [4]:

- Provoz při vysokých rychlostech ložiska pro střední až dlouhé životnosti. Systémy se suchým mazáním mají omezenou životnost a je zřídka možné zvolit tuhé mazání přesahující životnost 1000 milionů otáček.
- Trvalý provoz na vzduchu. Na vzduchu by se měla po delší dobu používat pouze tekutá maziva obsahující vhodná antioxidační činidla.

Vzhledem k tomu, že ve vesmíru se většinou nepohybujeme při těchto extrémních aplikacích a tím pádem se nám nevylučuje použití konkrétní kategorie maziva, je třeba při výběru mezi kapalným a tuhým mazivem vzít v úvahu jiné faktory. Tuhá maziva jsou vhodnější volbou, pokud požadujeme [4]:

- Provoz bez znečištění (olejové páry a migrace oleje)
- Elektrickou vodivost
- Jednodušší testování ložisek

Kapalná maziva jsou vhodnější volbou, pokud požadujeme [4]:

- Nejvyšší možnou tepelnou vodivost napříč tribokomponenty
- Nejnižší možný hluk od kroutícího momentu
- Minimální znečištění částicemi (částice vznikající opotřebením tuhého maziva v provozu)

3.5 Tuhá maziva

Tuhá maziva jsou materiály, které i přes svojí pevnou fázi, dokážou snížit tření mezi dvěma povrchy bez potřeby kapalného maziva. Ve vesmíru se využívá celá řada tuhých maziv. Mezi nejpoužívanější patří laminární tuhé látky, měkké kovy a polymery. Laminární tuhé látky zahrnují dichalkogenidy přechodových kovů jako je disulfid molybdenu (MoS_2) nebo disulfid wolframu. Mezi měkké kovy patří olovo, zlato a stříbro. Polyimidy a polytetrafluoretylen (PTFE) jsou polymerní materiály, které mají mazací vlastnosti. Měkké kovy a laminární tuhé látky jsou nanášeny jako tenké mazací povlaky, zatímco polymery se používají ve formě mazací klece ve valivém ložisku nebo jako materiál pouzdra. [1]

3.5.1 Výhody a nevýhody tuhých maziv

Výhody [4]:

- Zanedbatelný tlak par
- Zanedbatelná povrchová migrace
- Široký rozsah provozních teplot
- Rychlost opotřebení obvykle nezávislá na rychlosti
- Elektrická vodivost
- Tření a opotřebení jsou relativně necitlivé na rychlost
- Nízká kontaktní adheze

Nevýhody [4]:

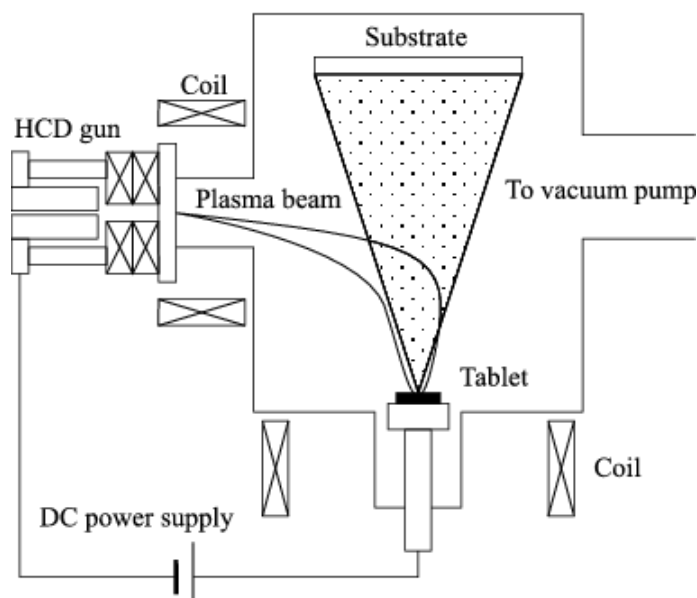
- Tvorba znečišťujících částic při opotřebení maziva
- Tepelná vodivost horší než u kapalných maziv
- Životnost omezená opotřebením maziva

3.5.2 Druhy povlaků

Vakuově nanášené filmy

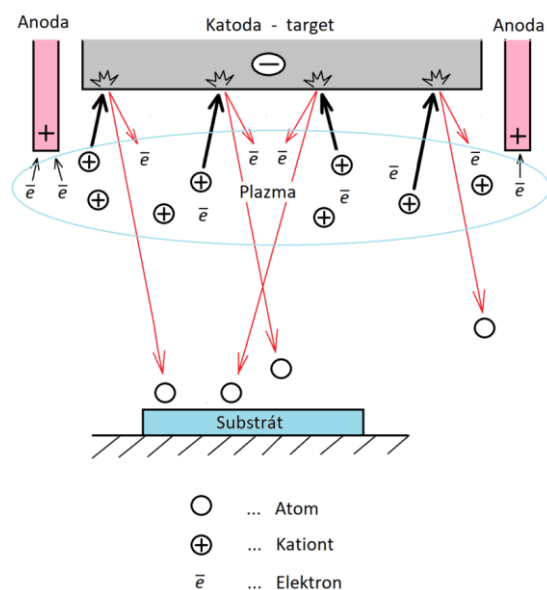
Nejčastěji používanými technikami jsou naprašování a iontové pokovování. Obě metody pracují na základě fyzikální depozice z plynné fáze (PVD), kde dochází k přechodu základního materiálu z pevné fáze na plynnou a poté se vrací na pevnou ve formě tenkého filmu. Substráty, součásti, na které film nanášíme, se standardně před nanesením filmu iontově čistí, čímž dosáhneme lepší přilnavosti filmu k substrátu. Dosahujeme tloušťky filmu kolem $1\text{ }\mu\text{m}$. [4]

Iontové pokovování se používá k nanášení měkkých kovů a poskytuje silně přilnavé povlaky. Při této technice se atomy měkkého kovu tepelně odpařují do argonové plazmy, kde se některé ionizují. Tyto ionty jsou pak urychlovány směrem k substrátu, kde dochází k růstu kovového filmu. Během růstu je film nepřetržitě bombardován argonovými ionty, které napomáhají udržovat rostoucí film bez vnikání nečistot a volně vázaných atomů filmu (viz Obr. 3-16). [31]



Obr. 3-16 Schéma iontového pokovování [31]

Naprašování se běžně používá pro depozici disulfidu molybdenu a dalších kovových dichalkogenidů za účelem vytvoření souvislého filmu. Naprašovaný materiál je zapojen jako katoda, na kterou je přiváděno elektrické napětí. V těsné blízkosti materiálu je přichycena anoda, která je většinou uzemněna ke stěně pracovní komory. Jejím hlavním úkolem je udržovat plazmový výboj ve vhodné pozici vůči katodě a tím usměrňovat odprašovaný materiál směrem k substrátu. Pracovní komora je vyplněna inertním plynem o nízkém tlaku, kterým bývá zpravidla argon. Zvýšíme-li dostatečně potenciálový rozdíl mezi katodou a anodou, katoda začne emitovat elektrony, které ionizují plyn na kladné ionty a záporné elektrony. V blízkosti katody tak vzniká oblak plazmy. Záporně nabitá katoda přitahuje z plazmy kladné ionty, které s vysokou rychlostí dopadají na katodu. Od katody jsou takto vyraženy atomy, které dopadají na substrát a dochází k růstu filmu (viz Obr. 3-17). [32]



Obr. 3-17 Schéma naprašování [32]

Leštěné filmy

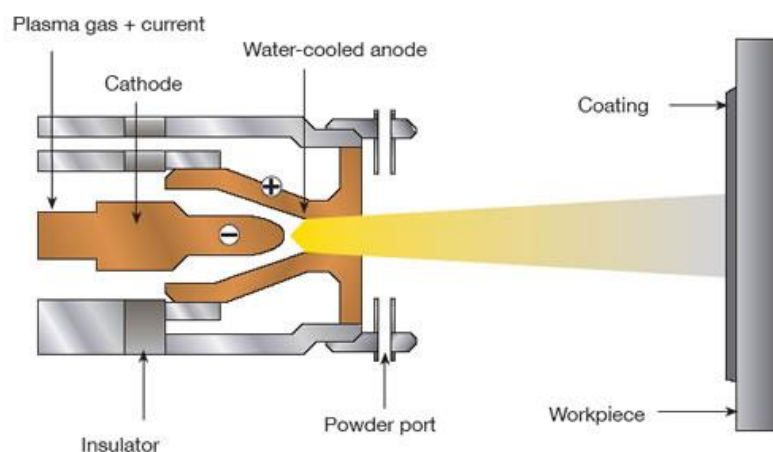
Leštění znamená vtírání prášků suchého maziva na povrch, který má být mazán. Jedná se o nejjednodušší metodu nanášení tuhých maziv ve formě tenkých filmů. Leštění lze provádět ručně pomocí lešticího hadříku, ale tato technika není příliš kvalitní a je obtížné reprodukovat filmy požadované tloušťky. Byly navrženy přesnější způsoby, při nichž se mazivo nanáší kontrolovanějším způsobem mechanickými prostředky.

Lepené povlaky

Jedná se o povlaky, u kterých jsou na substrát nalepeny mazací prášky, obvykle MoS_2 nebo PTFE, pomocí pojivových materiálů. Obecně se pojivo a prášek suspendují v rozpouštědle a výsledná disperze se nanáší na povrchy stříkáním, barvením nebo máčením. Povlaky využívající celulóзовé a akrylové pryskyřice jsou vytvrzovány vzduchem, povlaky nalepené termosetovou pryskyřicí vyžadují vytvrzení teplem. Tyto pryskyřice zahrnují epoxidy, fenoly, polyimidy, alkydy, silikony a polyfenylsulfid. Tyto povlaky nejsou vhodné pro přesné součásti, protože je obtížné dosáhnout přesné kontroly povlaku a tloušťka povlaku je typicky 25 μm . [4]

Plazmově stříkané povlaky

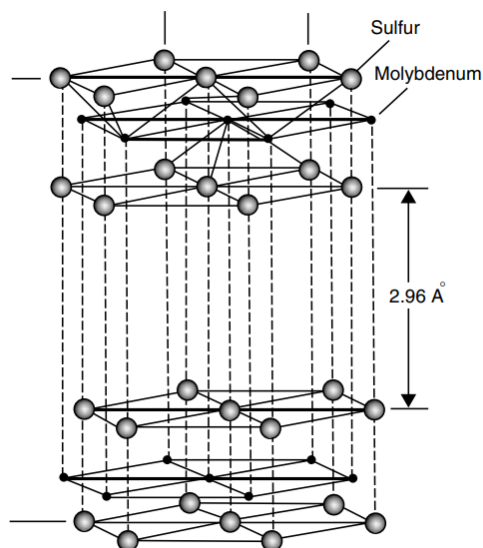
Při této technice je práškové mazivo rychle zahříváno v horkém plynném prostředí a poté urychlováno vysokou rychlostí na povrch, kde se tvoří povlak. Lze nanášet několik materiálů současně a tato schopnost byla využívána k výrobě vícesložkových povlaků obsahujících matici odolnou proti opotřebení. Pro vesmírné aplikace byla tato technika využita hlavně pro vývoj vysokoteplotních povlaků pro aplikaci na návratových modulech. [4]



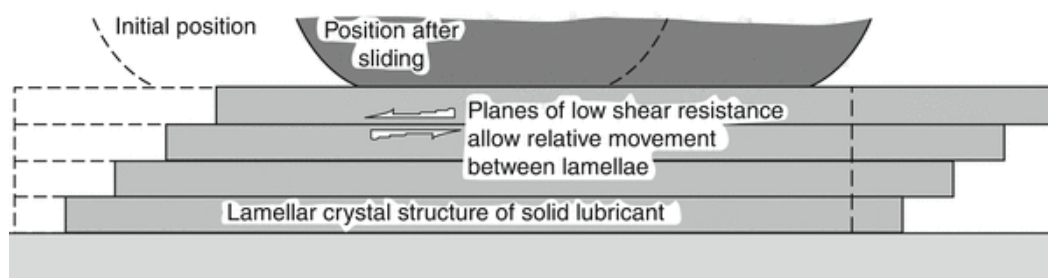
Obr. 3-18 Plazmové stříkání [33]

3.5.3 Laminární tuhá maziva

Laminární tuhá maziva vděčí za svoji schopnost fungovat jako mazivo své jedinečné vrstvené struktuře. Krystalové struktury těchto pevných látek jsou takové, že zatímco atomy ležící na stejné vrstvě jsou těsně u sebe a vzájemně silně vázány, samotné vrstvy jsou relativně daleko od sebe a síly, které je spojují, jsou slabé (např. Van der Waalsovy síly). Pokud se tyto vrstvy nacházejí mezi kluznými povrchy, mohou se rovnoběžně vyrovnat se směrem relativního pohybu a klouzat po sobě relativně snadno, čímž zajišťují nízké tření. Kromě toho se předpokládá, že silné interatomové spojení v každé vrstvě napomáhá snižovat poškození opotřebením. [34]



Obr. 3-19 Znárodnění vrstvené krystalické struktury disulfidu molybdenu [34]

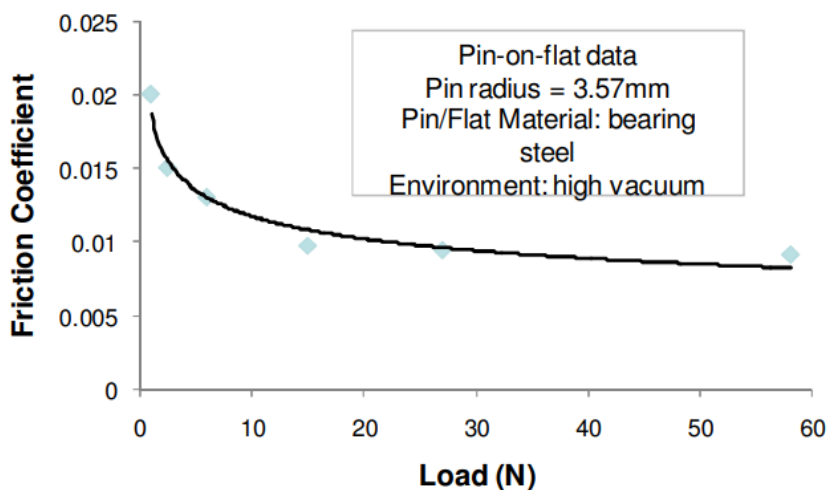


Obr. 3-20 Pohyb vrstev struktury při relativním pohybu [35]

Laminární tuhá maziva jsou nejpoužívanější třídou tuhých maziv. Mezi nejpoužívanější látky patří dichalkogenidy přechodových kovů (MoS_2 , WS_2), grafit, hexagonální nitrid bóru (HBN) a kyselina boritá (H_3BO_3). MoS_2 , grafit a kyselina boritá jsou přírodní látky. Ostatní maziva jako např. WS_2 nebo fluorovaný grafit jsou synteticky vytvořené a používané v mnohem menším měřítku než předchozí jmenované. Disulfid molybdenu a disulfid wolframu jsou vhodnou volbou pro letecký a kosmický průmysl a kryogenní aplikace, zatímco HBN je preferován pro mazání při zvýšených teplotách. Grafit a H_3BO_3 pracují velmi dobře na vlhkém vzduchu, ale nenabízejí téměř žádnou maznost v suchém prostředí nebo ve vakuu. [34]

MoS_2 se již mnoho let úspěšně používá ve vesmíru a jedná se tak o nejvíce využívané tuhé mazivo. Mazivo lépe pracuje ve vakuu než na vlhkém vzduchu, protože při absenci vlhkosti dosahuje nejnižšího koeficientu tření a nejvyšší odolnosti proti otěru. Nejvhodnější metodou pro tvorbu povlaku je naprašování. Tribologická účinnost těchto filmů je extrémně závislá na podmínkách, za kterých naprašování probíhá. Například přítomnost kyslíku v prostředí naprašování může ovlivnit výsledné tření i životnost. Drsnost povrchu substrátu má navíc výrazný vliv na tření a opotřebení. U ocelových povrchů ložisek dosáhneme optimální životnosti při nominální drsnosti povrchu $0,2\ \mu\text{m}$. [1] [15]

Naprašované povlaky MoS_2 ve vakuu typicky dosahují hodnot koeficientu tření v rozsahu 0,01–0,06. Skutečná hodnota závisí na zatížení, rotační rychlosti a materiálu substrátu. Pro ukázkou lze v grafu Graf 3-4 vidět závislost zatížení na koeficientu tření ve vakuu. Pokud bychom tyto filmy použily na vlhkém vzduchu, hodnota koeficientu by stoupla na hodnotu kolem 0,15 a došlo by k výraznému poklesu životnosti. [4]



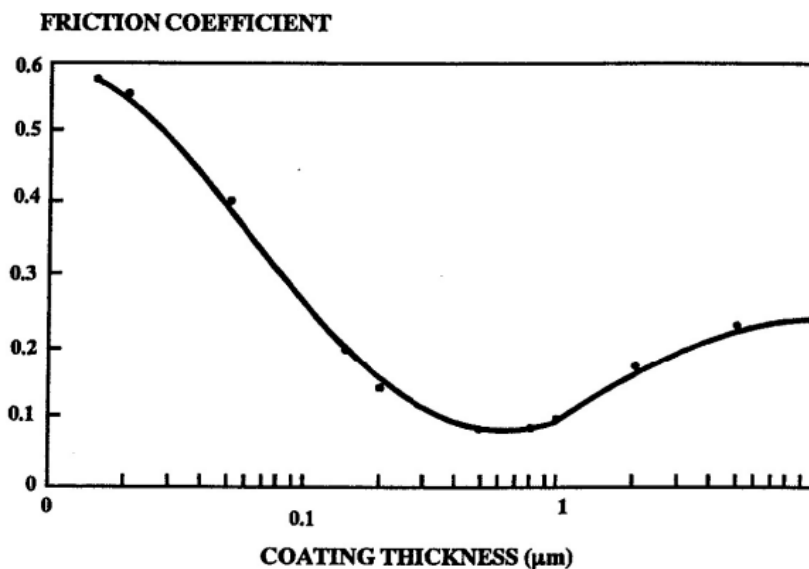
Graf 3-4 Závislost zatížení na koeficientu tření ve vakuu [4]

WS₂ má velmi podobné vlastnosti jako MoS₂, ale je používán v mnohem menším rozsahu. Má lepší termální a oxidační stabilitu, naproti tomu cena je vyšší, protože se jedná o syntetickou látku. [4]

3.5.4 Měkké kovy

Díky nízké pevnosti ve smyku a rychlému zotavení a rekrystalizaci, mohou některé čisté kovy poskytovat nízké tření na kluzných površích. Jedná se výhradně o indium, cín, olovo, stříbro, zlato a platinu. Hlavní důvod použití jako tuhá maziva je ten, že nabízejí kombinaci důležitých vlastností, které nejsou u jiných tuhých maziv k dispozici. Například kromě své měkké povahy má stříbro vynikající elektrickou a tepelnou vodivost, odolnost proti oxidaci, dobrou tendenci k tvorbě povlaku a relativně vysokou teplotu tání. Pb, In a Sn nabízejí dobrou maznost při pokojové teplotě, zatímco Ag, Au a Pt jsou vhodnější pro vysokoteplotní aplikace díky vyšší teplotě tání a lepší oxidační stabilitě. [36] [34]

V současnosti nejpoužívanějším kovem pro kosmický průmysl je olovo. V praxi bylo prokázáno, že nejvhodnější metodou pro vytvoření mazacího povlaku je iontové pokovování, které zajišťuje vysoce adherentní olověnou vrstvu. U valivých ložisek se tato metoda používá v kombinaci s klecí z olověného bronzu. Tloušťka kovového filmu hraje významnou roli jak pro tření, tak i pro opotřebení. Nejnížší koeficienty tření a rychlosti opotřebení se obvykle dosahují u tenkých filmů a za vyšších kontaktních tlaků. Příliš tenký film má však tendenci se rychle opotřebovávat. Jak lze vidět v grafu Graf 3-5, optimálního mazání je dosaženo při tloušťce filmu zhruba 1 μm . [36] [15]



Graf 3-5 Závislost koeficientu tření na tloušťce povlaku [4]

Životnost olověných filmů vystavených čistě klouzání je velmi omezená a takové povlaky by se neměly používat na součásti jako jsou vačky a západky. Olověné povlaky jsou neúčinnější na přesných součástech jako jsou ložiska, šrouby a ozubená kola. Olověné filmy jsou účinné ve vakuu od kryogenní teploty až do 550 K. [36] [4]

3.5.5 Polymery a polymerní kompozity

Polymery v různých formách jsou široce používány v tribologii. Jsou lehké, relativně levné a snadno se vyrábějí. Lze je snadno smíchat s jinými pevnými látkami a vytvořit tak samomazné kompozitní struktury. Některé polymery jsou samomazné při použití jak ve formě mazací klece, tak i ve formě tenkého filmu, nebo jako pojiva pro jiná tuhá maziva. Povlaky lze vyrobit na tribologickém povrchu tak, že se prášek nejprve nastříká a poté vytvrdí za vysokých teplot. [34]

Nejběžnějším tuhým mazivem na bázi polymerů je polytetrafluoretylen (PTFE), který je obecně známý jako teflon. Má velmi nízký koeficient tření pohybující se typicky kolem hodnot 0,04–0,2 a jeho funkčnost není negativně ovlivněna vakuem. Čistý PTFE se pro technické aplikace obvykle nepoužívá, protože má špatné mechanické vlastnosti. PTFE ztrácí mazací schopnost nad průměrným kontaktním tlakem 800 MPa a nad teplotami 280°C. Jeho tření se také zvyšuje s rostoucí rychlostí. [37] [4]

Mezi další využívané polymery se řadí polyacetalu nebo třeba polyethylen s mimořádně vysokou molární hmotností (UHMWPE). Oba jsou široce používány pro málo přesná ozubená kola v mechanismech kosmických lodí. [37]

Polyimidy jsou široce používány v mechanismech kosmických lodí díky jejich příznivým tribologickým vlastnostem při vysokých tlacích v ložiscích a rychlostí, vynikajícím mechanickým vlastnostem a vysoké tepelné stabilitě při teplotách až 315 °C. [4]

Tribologické a mechanické vlastnosti polymerů lze upravit začleněním pevných plnidel do matrice. Ty mohou být ve formě částic nebo vláken. Vlákná se přidávají do technických polymerů, aby se zvýšila jejich tuhost, pevnost a odolnost proti migraci. Vlákná mají obvykle průměr 5–10 μm a mohou být celistvá, mletá nebo sekaná. Velikost a orientace vláken ovlivňují odolnost proti opotřebení a mechanické vlastnosti. Typické materiály vláken pro vesmírné aplikace jsou sklo a uhlík. [37] [4]

Jedním z velmi používaných kompozitních materiálů byl Duroid. Je to kompozit PTFE se sekanými skleněnými vlákny v kombinaci s MoS₂. Byl hojně užívaný jako materiál klecí ložisek buď jako samostatný zdroj mazání nebo v kombinaci s mazacím povlakem z MoS₂. Duroid se v současné době již nevyrábí a je nahrazován jinými kompozitními materiály podobných nebo lepších vlastností. Vhodnou náhradou je kompozit PGM-HT. [38] [4]

3.6 Kapalná maziva

V posledních desetiletích bylo pro vesmírné aplikace použito mnoho různých chemických tříd kapalných maziv. Patří mezi ně minerální oleje, silikony, syntetické uhlovodíky, estery a perfluoropolyethery. [1]

3.6.1 Výhody a nevýhody kapalných maziv

Výhody [4]:

- Tření a opotřebení necitlivé na plynné prostředí
- Dlouhá životnost při EHD podmínkách
- Tepelná vodivost vyšší než u pevných látek
- Nevytváří znečišťující částice při opotřebení
- Relativně levné a snadno použitelné

Nevýhody [4]:

- Nezanedbatelný tlak par
- Viskozita závislá na teplotě
- Povrchová migrace
- Úzký rozsah provozní teploty
- Mazací režim závislý na rychlosti
- Degradace některých olejů v režimu mezního mazání

3.6.2 Silikony

Silikonové kapaliny mají nízký tlak par a nízké body tuhnutí. Z těchto důvodů byly během prvních let průzkumu vesmíru poměrně často používány jako vesmírná maziva. Během provozu se však zjistilo několik nedostatků. Silikony měli velkou tendenci k povrchové migraci a vytvářeli polymerní usazeniny na třecích a valivých plochách. Polymerní usazeniny vedly ke zhoršení běhu ložisek a poté i k předčasnému selhání. Silikonové kapaliny byly tedy jako maziva jen málo úspěšné a dnes by se neměly považovat za vhodná maziva pro kosmické lodě. Mohou být však použity pro nemazací aplikace například v hydraulických systémech nebo jako kapaliny pro tlumiče. [12]

3.6.3 Minerální oleje

Velice rozšířený druh maziv pro pozemské použití. Mají velice dobré mazací vlastnosti při mezním mazání a lze v nich snadno rozpouštět aditiva. Jak lze vidět na obrázku Obr. 3-4, minerální oleje mají vyšší tlak par oproti ostatním mazivům. Proto se často používají pro vesmírné aplikace v kompletně utěsněných mazacích systémech. Mezi tyto aplikace patřila v minulosti momentová a reakční kola. Velice využívané byly oleje KG80 a Apiezon C. [12] [4]

Tyto kapaliny jsou vysoce rafinované, buď pomocí hydrogenace nebo perkolací bauxitem, za účelem odstranění co nejvíce nečistot. Rafinací se sice sníží mazací vlastnosti, ale výrazně se zlepši jejich rozpustnost s aditivu, kterými se dále upravují vlastnosti minerálních olejů. Tabulka Tab. 3-2 ukazuje v současnosti dostupné minerální oleje vhodné do vesmíru a jejich důležité parametry. [1]

Tab. 3-2 Vlastnosti minerálních olejů pro vesmírné aplikace [4]

Minerální oleje	Tlak par (mbar při 20 °C)	Bod tuhnutí (°C)	Maximální teplota (°C)	Kinematická viskozita při 20 °C (mm ² · s ⁻¹)	Viskozitní index
Vackote	10 ⁻⁸	-41	160	210	108
Apiezon C	10 ⁻⁸	-12	232	283	110
Teresso V78	-	-7	250	400	105
Coray 55	10 ⁻⁵	-15	121	220	98

3.6.4 Perfluoropolyethery (PFPE)

Jedná se o jeden z nejrozšířenějších druhů maziv pro kosmické aplikace. Ve vesmíru se používají již více než 40 let. Tyto syntetické oleje vynikají svými chemickými vlastnostmi a zdají se být ideálními kandidáty pro vesmírné mazání. Mají velmi nízký tlak par, velmi nízký bod tuhnutí a vyšší index viskozity než minerální oleje. Fluorová struktura polymeru zajišťuje chemickou inertnost a stabilitu v relativně širokém teplotním rozmezí. Jejich inertnost však přináší jednu nevýhodu. Minimum materiálů je v nich rozpustných, odpadá tedy možnost použití konvenčních aditiv. [12] [4]

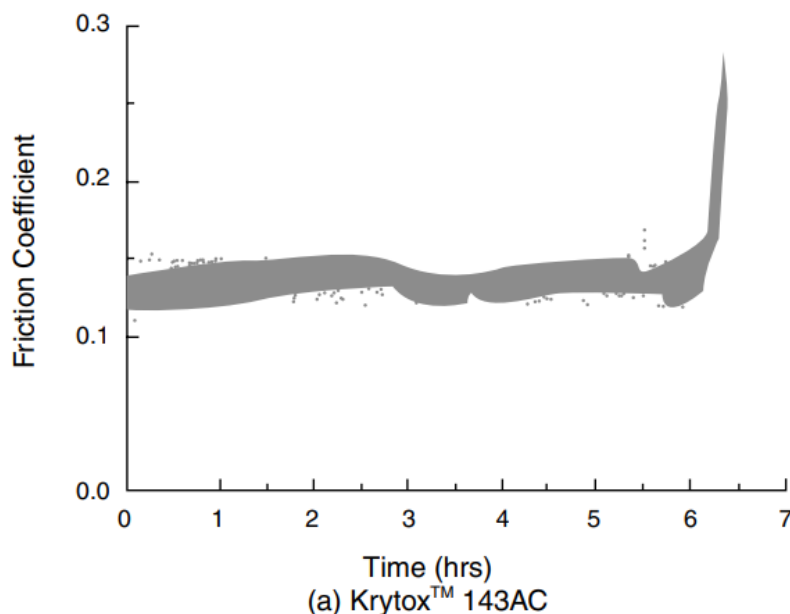
Velmi užitečné se v minulosti prokázaly tři komerční kapaliny. Jedná se o Krytox 143AC, Fomblin Z25 a Brayco 815Z. Tyto kapaliny mají nejnižší tlaky par a nejvyšší viskozitní indexy v porovnání s ostatními PFPE oleji. Vybraná PFPE maziva a jejich základní vlastnosti zachycuje tabulka Tab. 3-3. Vyšší viskozita maziv zajišťuje nižší rychlost vypařování, je tedy snaha vybírat co nejvyšší viskozitu pro zvýšení životnosti. Bohužel vyšší viskozita má za následek zvýšení kroutícího momentu. [11]

Tab. 3-3 Vlastnosti PFPE olejů pro vesmírné aplikace [4]

PFPE oleje	Tlak par (mbar při 20 °C)	Bod tuhnutí (°C)	Maximální teplota (°C)	Kinematická viskozita při 20 °C (mm ² · s ⁻¹)	Viskozitní index
Fomblin YVAC40	$9 \cdot 10^{-12}$	-32	150	460	135
Fomblin Z25	$1,6 \cdot 10^{-13}$	-75	250	260	358
Brayco 815Z	$2 \cdot 10^{-12}$	-73	204	250	350
Demnum S-200	$5 \cdot 10^{-11}$	-53	350	500	210
Krytox 143AC	10^{-6}	-35	285	800	134
Barrierta	10^{-8}	-50	120	280	120

PFPE kapaliny mají neobvykle nízké povrchové napětí, a proto jsou náchylnější ke creepu než jiné konvenční kapaliny. Jedním ze způsobů, jak zmírnit riziko, je fluorokarbonová bariéra s nízkou povrchovou energií nanesená na plochách ložiska. Kapaliny PFPE však mají tendenci v průběhu času bariérovou fólii rozpouštět. [10]

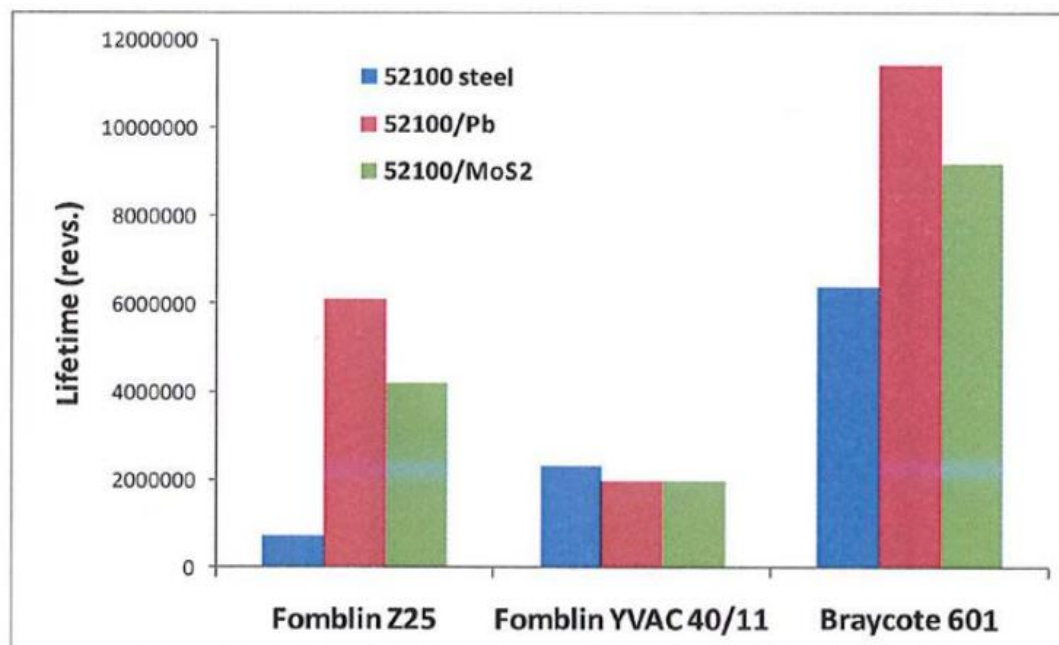
PFPE jsou velmi dobré pro mazání v hydrodynamických a elastohydrodynamických režimech. Vysoká hustota PFPE kapaliny, téměř dvojnásobná oproti jiným kapalinám, je výhodná pro EHD mazání. Při podobné kinematické viskozitě poskytují kapaliny PFPE téměř dvojnásobnou tloušťku filmu v EHD režimu ve srovnání s běžnými kapalinami. Naopak nevhodné použití je za podmínek mezního mazání, při kterém PFPE začne degradovat. Degradace kapaliny může mít za následek vyšší tření, hluk krouticího momentu ložiska, nadměrné opotřebení a případně poruchu ložiska. [12] [10]



Graf 3-6 Závislost koeficientu tření na čase u PFPE maziva [1]

Vzhledem k faktu, že se jedná o nejvhodnější mazivo do vesmírného prostředí, degradace PFPE byla v minulosti velmi zkoumanou záležitostí. Po provedení velké řady experimentů vyšel problém na povrch. Zjistilo se, že fluor uvolňující se z oleje při opakovaném tření za vysokého kontaktního tlaku reaguje s železem v oceli a vzniká fluorid železitý (FeF_3). Přestože jsou PFPE oleje chemicky inertní vůči většině materiálů, trpí katalytickým útokem FeF_3 a jiných fluoridů kovů, což vede k rozpadu dalších molekul a uvolnění ještě více fluoru. Následuje řetězová reakce a degradace oleje je rychlá. Skokovou změnu koeficientu tření způsobenou degradací můžeme vidět v grafu Graf 3-6 [4]

Nástup degradace oleje podporuje mnoho faktorů jako je např. malá tloušťka mazacího filmu, vysoká teplota a kontaktní tlak, vakuové prostředí a další. Naštěstí u ocelových materiálů se dá degradace oddálit použitím keramických povlaků jako jsou TiN a TiC. Účinným prostředkem u ocelových ložisek se prokázalo použití tělísek potažených TiC. Životnost oleje také prodlužuje nanesení tenkých vrstev iontově pokoveného olova nebo naprašovaného MoS_2 . Na grafu Graf 3-7 lze vidět změnu životnosti při použití těchto metod u vybraných PFPE maziv. [4]



Graf 3-7 Efekt olověných a MoS₂ povlaků na životnosti PFPE maziv [4]

3.6.5 Syntetické uhlovodíky

Mezi hlavní důvody přípravy syntetických uhlovodíků patří chemická syntéza zaručující určité struktury a charakteristiky a také možnost regulace molekulární hmotnosti v úzkém rozmezí. Proto vlastnosti, které jsou funkcí molekulární hmotnosti, jako bod varu, tlak par, viskozita a nízkoteplotní charakteristika, mohou být také kontrolovány. V současnosti jsou dostupné dvě skupiny syntetických uhlovodíků. Jedná se o polyalfaolefiny (PAO) a mnohonásobně alkylované cyklopentany (MAC). [39] [1]

Polyalfaolefiny se vyrábí oligomerací lineárních alfa-olefinů se šesti nebo více atomy uhlíku. [1] Jedná se o jedny z nejpoužívanějších pozemských maziv. Velké uplatnění v automobilovém průmyslu. V kosmickém průmyslu v minulosti uplatněny díky chemickým vlastnostem podobným minerálním olejům s výjimkou nižšího tlaku par. Tyto syntetické uhlovodíky lze mísit s konvenčními aditivy, aby byla zajištěna ochrana proti opotřebení, oxidaci a korozi. Nízké tlaky par základních PAO olejů však činí aditiva nejtěkavějšími složkami formulovaného maziva. Je tedy třeba použít vhodná aditiva s nižšími tlaky par. Pro kosmický průmysl se používají PAO maziva s komerčním označením Nye 179 a Nye 176A, jejichž vlastnosti ukazuje tabulka Tab. 3-4. [12]

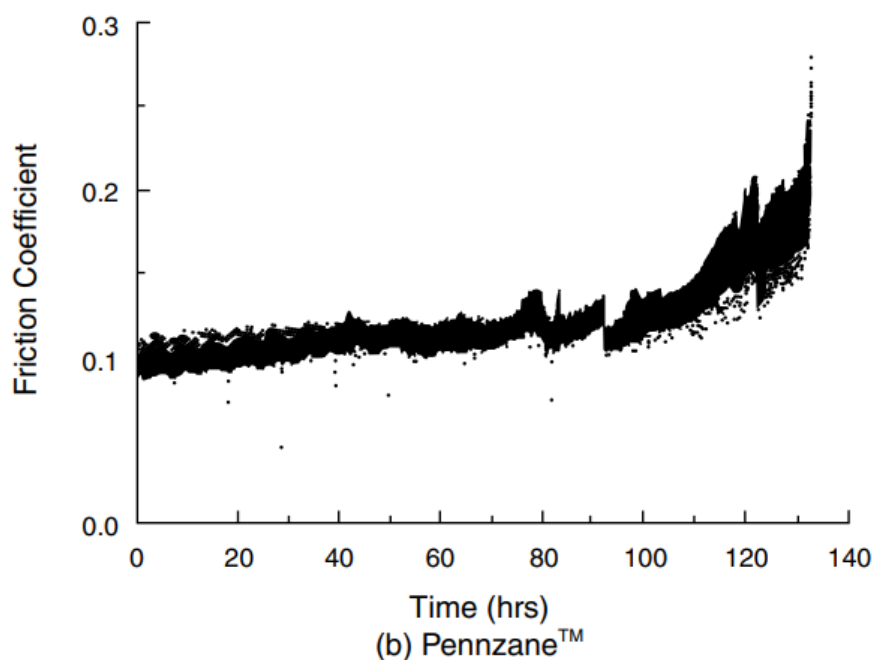
Druhá třída uhlovodíků je známá jako MAC. Připravuje se z dicyklopentadienu reakcí s alifatickými alkoholy v přítomnosti silné báze. Nakonec se hydrogenují za vzniku finálního produktu. Bylo zjištěno, že vlastnosti tekutin lze přizpůsobit konkrétním aplikacím změnou povahy alkoholů použitých při syntéze. Kinematické viskozity se tak pohybují při 100 °C od $2 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ do $20 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Viskozitní indexy lze regulovat v rozmezí od 20 do 180 a body tuhnutí klesají až -60 °C [12]. MAC maziva mají vyšší povrchové napětí než PFPE maziva, mají tedy menší sklon k povrchové migraci. [10]

Doposud byly pro vesmírné aplikace k dispozici tři produkty s označením Pennzane. Ve vesmíru použita verze SHF X2000 a její parametry lze vyčíst z tabulky Tab. 3-4. Nepředpokládá se významný vesmírný rozvoj v budoucnu, jsou však stále pod rozsáhlým zkoumáním. [10]

Tab. 3-4 Vlastnosti PAO a MAC olejů pro vesmírné použití [4] [1]

PAO a MAC oleje	Tlak par (mbar při 20 °C)	Bod tuhnutí (°C)	Maximální teplota (°C)	Kinematická viskozita při 20 °C ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Viskozitní index
Nye 179	10^{-8}	-67	-	66	139
Nye 176A	-	-43	120	1050	142
Pennzane SHFX-2000	$2,2 \cdot 10^{-13}$	-48	300	260	137

Kapaliny MAC a PAO degradují v režimu mezního mazání na „třecí polymer“, který má obvykle krátkodobé příznivé účinky, ale představuje ztrátu maziva pro mechanismus. Obvykle jsou tyto kapaliny formulovány s aditivami, které zvyšují jejich mezní mazací výkon a stabilitu [10]. Tyto maziva převyšují životnost v režimu mezního mazání PFPE oleje a mají pomalejší nástup do porušení, což je charakterizováno postupným zvyšováním koeficientu tření (viz Graf 3-8). [1]



Graf 3-8 Závislost koeficientu tření na čase u MAC maziva [1]

3.6.6 Estery

Jako vhodná maziva do kosmu také připadají syntetické estery, zejména se jedná o polyolestery (POE) a neopentylestery (NPE). Vynikají pro svůj široký rozsah provozních teplot a nízkou těkavost. Estery jsou ze své podstaty dobrá mezní maziva a jsou k dispozici v širokém rozmezí viskozit. [4]

3.6.7 Křemičité uhlovodíky

V 90. letech minulého století se objevil relativně nový druh vesmírného maziva. Tyto materiály obsahují pouze křemík, uhlík a vodík. Do současnosti byla provedena řada experimentů, které ukázaly, že tyto uhlovodíky mají významně nižší teploty tání ve srovnání s ostatními uhlovodíky. Jsou nadřazeny minerálním olejům a syntetickým uhlovodíkům po stránce teplotní a oxidační stability a také ve viskozitně teplotním chování. Dobře rozpouští konvenční aditiva. Dosud nevyužity ve vesmíru. [40]

3.6.8 Aditiva

Mnoho komerčních lubrikantů používá aditiva specificky formulované jako látky zlepšující viskozitu, odpěňovací činidla, inhibitory koroze, látky snižující teplotu tuhnutí a neutralizátory kyselosti. Velmi málo z nich má význam při výběru kapalných maziv pro mechanismy kosmických lodí. Antioxidanty, jako jsou fenoly a aminy, se však používají v kosmických mazivech, aby se zabránilo degradaci tekutin během skladování na zemi. Mohou být také použity inhibitory koroze, pokud jsou rozpustné v oleji. Bohužel se tyto inhibitory nerozpustí v PFPE, které jsou ze své podstaty špatné z hlediska ochrany proti korozi. [4]

Vlastnosti oleje v režimu mezního mazání lze zlepšit přidáním aditiv pro extrémní tlak. Jedná se o chemikálie, které reagují s kovovými povrchy, na nichž vytvářejí ochranné vrstvy sulfidů kovů, fosfidů kovů a další. Tím se předejde přímému styku kovů. Chemická reakce je podporována vysokými teplotami generovanými v místech kontaktu. [4]

Obecně by se mělo používat minimální množství aditiv, protože nadměrné množství podporuje korozi. Dále mohou aditiva navýšit tlak par, čímž dojde ke vzrůstu těkavosti a maziva se tak mohou stát nevhodnými do neuzavřených mechanismů. [4]

3.7 Plastická maziva

Plastické mazivo je polotuhá kapalina, která se skládá z kapalného maziva (oleje) a zahušťovadla. Olej plní roli mazání, zatímco zahušťovadlo udržuje olej pohromadě a poskytuje odpor proti tečení. Zahušťovadlo do značné míry ovlivňuje vlastnosti plastického maziva. Pokud bude zahušťovadlo např. hydrofobní, mazivo nebude ovlivněno vodou. Nejčastěji jsou plastická maziva zahuštěna mýdly. Mýdlem se myslí směs kovových prvků mastných kyselin. Kovové prvky používané k výrobě mýdel zahrnují lithium, vápník, sodík, hliník a baryum. Jako zahušťovadla jsou také někdy využívány jemné částice mazacích aditiv jako je PTFE nebo olovo. Stejně jako do olejů se i do plastických maziv často přidávají aditiva ke zlepšení únosnosti, oxidační odolnosti, koroze a další. [12]

Plastická maziva se používají pro různé vesmírné aplikace. Jedná se kuličková ložiska s kosoúhlým stykem s nízkou až vysokou rychlostí, kluzná ložiska a ozubená kola. Primárním důvodem použití plastického maziva je to, že plastické mazivo může fungovat jako zásobník pro přívod oleje ke kontaktním povrchům. Může také působit jako fyzická bariéra, aby se zabránilo ztrátě oleje vlivem povrchové migrace nebo odstředivými silami. [41]

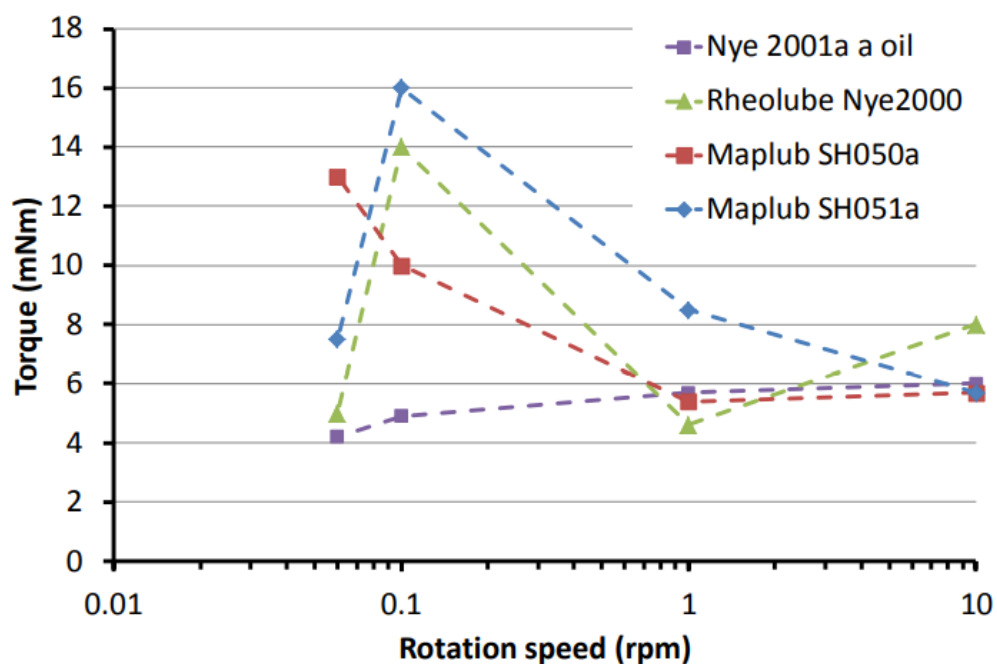
V kosmických mechanismech se hojně používají plastická maziva na bázi PFPE se zahušťovadly PTFE (série Krytox 240 a Braycote 600). V minulém desetiletí byla do vesmírného provozu uvedena uhlovodíková plastická maziva na bázi kapalin MAC s přísadami ke zlepšení mezního mazání (Rheolube 2000). Studie provedené pro porovnání životnosti plastických maziv na bázi PFPE a MAC za podmínek mezního mazání ukázaly, že stejně jako u kapalných olejů mají plastická maziva na bázi MAC delší mazací životnost ve srovnání s plastickými mazivy na bázi PFPE. Aktuálně dostupná plastická maziva pro vesmírné aplikace lze vidět v tabulce Tab. 3-5. [10]

Tab. 3-5 Vlastnosti plastických maziv pro vesmírné použití [4]

Plastické mazivo	Typ	Tlak par (mbar při 20 °C)	Bod tuhnutí (°C)	Maximální teplota (°C)	Kinematická viskozita při 20 °C (mm ² · s ⁻¹)	Viskozitní index
Fomblin ZNF	PFPE	$2 \cdot 10^{-12}$	-70	220	260	358
Braycote 601	PFPE	$5 \cdot 10^{-12}$	-73	204	250	350
Rheolube 2000	MAC	-	-45	125	260	137
Andok C	Minerální	10^{-5}	-15	121	220	-15

Bylo upozorováno, že ložiska mazaná plastickým mazivem mohou při nízkých otáčkách vykazovat neobvykle vysoké kroutící momenty. Tato anomálie má výrazný dopad na nízko rychlostní aplikace jako jsou polohovací a sledovací mechanismy. Bylo experimentálně zjištěno, že průměrná hodnota kroutícího momentu může být až pětikrát vyšší než očekávaná hodnota, a to nejčastěji při otáčkách pohybujících se okolo hodnoty $0,1 \text{ s}^{-1}$. [42]

Z dosavadních testů bylo zjištěno, že kapalná maziva se chovají podle očekávání, tedy že s rostoucími otáčkami roste i kroutící moment vlivem měnící se viskozity. U plastických maziv je tomu naopak. Kroutící moment je neobvykle vysoký při velmi nízkých otáčkách, s jejich růstem však konverguje k hodnotě podobné jako u kapalných maziv. Tuto závislost lze upozorovat v grafu Graf 3-9, kde je porovnáno chování vybraného oleje Nye 2001a a plastických maziv za stejných podmínek. [42]



Graf 3-9 Chování krouticího momentu v závislosti na otáčkách pro plastická a kapalná maziva [42]

Byl vyvozen závěr, že vysoké a nepravidelné momenty pozorované v ložiscích mazaných plastickým mazivem souvisejí s přítomností plnicích částic zahušťovadla, nejčastěji PTFE, a že obecně je anomální chování krouticího momentu podpořeno provozem při nízkých otáčkách a vysokém zatížení. Tento nežádoucí efekt však do současnosti nebyl dostatečně prozkoumán a pochopen, je proto důležité zvážit vhodnost použití plastických maziv pro kosmické aplikace. [42]

4 DISKUZE

V diskuzní části bude proveden návrh tribologického systému pro konkrétní mechanismus satelitu. Můj návrh se bude zabírat volbou duplexního ložiska a jeho mazání pro podporu reakčního kola satelitu. Toto konkrétní reakční kolo pracuje za provozních teplot od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pracovní otáčky jsou 3000 min^{-1} v nonstop provozu. Hmotnost kola je 5 kg a požadovaná životnost je 6 let.

4.1 Reakční kola

Reakční kola jsou aktuátory, které slouží k řízení a stabilizaci polohy kosmické lodi na požadované úrovni. Jedná se o zařízení, které funguje na principu zachování momentu hybnosti. Točivý moment, který vzniká změnou momentu hybnosti kola, se využívá k natočení satelitu do požadovaného směru. Vzhledem k tomu, že setrvačnost satelitu je v porovnání se setrvačností kol velká, je pomocí těchto systémů možné velmi přesně řídit orientaci družice. Používají se minimálně 3 reakční kola na jednom satelitu pro tříosé řízení polohy. [43] [44]

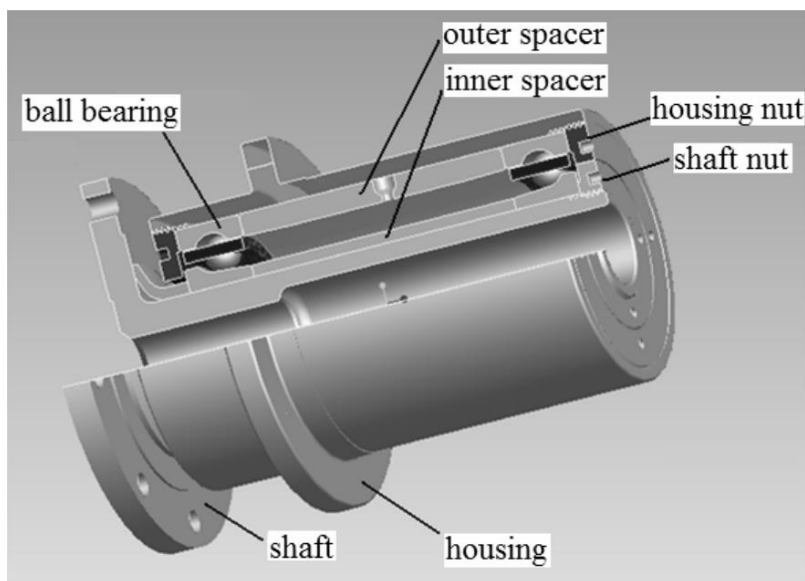
Typické reakční kolo obsahuje setrvačník, který je poháněn elektromotorem, zpravidla bezkartáčovým stejnosměrným motorem. Jeho přesné otáčení kolem pevné osy je zajištěno upevněním na ložiskovou jednotku tvořenou dvojicí vysoce přesných ložisek. Otáčky setrvačníku jsou řízeny elektrickým obvodem. Všechny tyto součásti jsou uzavřeny v hermeticky uzavřeném kovovém pouzdře. [43] [44]



Obr. 4-1 Reakční kolo satelitu [45]

4.2 Návrh ložisek

Ložisková jednotka je nejkritičtější podsestavou. Do značné míry ovlivňuje životnost a výkon reakčních kol. Obrázek Obr. 4-2 zobrazuje typickou ložiskovou jednotku užívanou u reakčních kol. Tato podsestava byla zvolena pro můj návrh. Konkrétní ložiska byla vybrána z katalogu firmy Kaydon [46]. Ložiska této firmy byla již v minulosti úspěšně použita u kosmických lodí. Zaměřuje se výhradně na tenkostěnná ložiska, která nabízejí úsporu váhy a místa při zachování vysoké tuhosti.



Obr. 4-2 Ložisková jednotka reakčního kola [43]

Jako vhodná ložiska byla zvolena kuličková ložiska s kosoúhlým stykem s označením Kaydon NB040AH0. Materiál ložisek je ocel AISI 52100, jejíž korozní odolnost je velmi nízká. Kroužky těchto tenkostěnných ložisek jsou však pokryty povlakem Endurakote, který zvyšuje odolnost proti korozi na úroveň nerezových ocelí a poskytuje výrazné zlepšení životnosti v nepříznivém prostředí. [46]

Endurakote je chromový povlak nanesený vhodným elektrolytickým procesem. Dosáhne se skutečné molekulární vazby, která zajistí, že nedojde k odlupování ani při vysokém kontaktním tlaku na ložiskových drahách. Takto vytvořený velmi tvrdý povlak je extrémně odolný proti opotřebení a výborně udržuje mazací film. Lze dosáhnout tvrdosti povrchu vyšší než 70 HRC. Tato ložiska jsou navržena tak, aby si zachovala své provozní vlastnosti v rozsahu teplot od -53 °C do 122 °C, což vyhovuje zadání. [46]



Obr. 4-3 Kaydon kuličkové ložisko s Endurakote povlakem [47]

Ložiska budou použita v duplexním uspořádání a uložena zády k sobě, čímž docílíme vysoké tuhosti. Jednotlivá ložiska jsou od sebe oddělena sadou stejně dlouhých distančních kroužků (viz Obr. 4-2). Ložiska a součásti ložiskové jednotky jsou obvykle vyrobeny z podobného materiálu, aby se eliminovaly účinky tepelného namáhání, protože v provozu jsou reakční kola vystavena širokému rozsahu teplot.

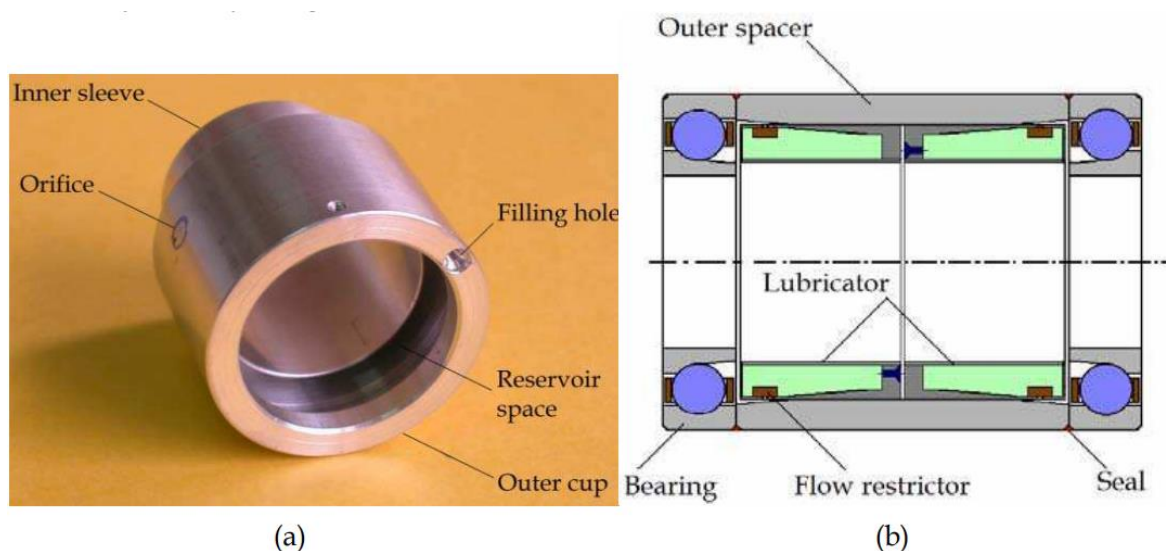
Jako vhodná klec byla zvolena masivní klec z fenolického laminátu. Klece vyrobené z tohoto materiálu jsou schopné absorbovat určité množství oleje ve svém těle a mohou fungovat jako zdroj maziva. Fenolické klece se před impregnací olejem pečlivě a důkladně vysuší, aby se odstranila veškerá absorbovaná vlhkost. V opačném případě nebude klec plně nasycena a mohla by absorbovat nebo přivádět více oleje než je třeba. Fenolická klec při impregnaci kapalným mazivem obvykle absorbuje 3–5 % své hmotnosti. To odpovídá zhruba 60 mg maziva. V kombinaci se zhruba 30 mg maziva nacházejícího se přímo na ložiskových plochách dokáže ložisko pracovat v nepřetržitém provozu po dobu 3-4 let se stabilním výkonem [43] [44]. Pro splnění požadované životnosti 6 let je proto potřeba zavést doplňkový mazací systém.

4.3 Návrh maziva

Nejlepší volbou pro mazání reakčních kol jsou kapalná maziva, a to primárně z důvodu prakticky nulového opotřebení ložiskovým kontaktních ploch oddělených EHD filmem, čímž mají potenciál k nekonečné životnosti. Konkrétně byl zvolen syntetický PFPE olej Fomblin Z25, jehož vlastnosti jsou v Tab. 3-3. Nabízí nízký tlak par, velmi vysoký index viskozity a dobré vlastnosti při extrémním tlaku. Vzhledem k faktu, že reakční kola jsou navržena pro provoz v oblasti elastohydrodynamického mazání, není třeba brát v potaz degradaci, ke které by mohlo dojít v režimu mezního mazání. [44]

Jak již bylo zmíněno, k zajištění určené životnosti je třeba zavést doplňkový mazací systém. Mazací systémy používané u reakčních kol lze rozdělit do dvou skupin. Aktivní mazací systémy dodávají do ložisek řízené množství maziva na základě vnějších povelů. Pasivní systémy dodávají mazivo do ložisek nepřetržitě a jsou poháněny odstředivou silou nebo silou povrchové migrace. [43]

Pro ložiskovou jednotku byla zvolena rotační odstředivá maznice. Jedná se o pasivní systém pracující na principu působení odstředivých sil při rotaci. Maznice se skládá z vnitřního a vnějšího pouzdra. Při sestavení těchto pouzder vznikne dutina, která funguje jako zásobník oleje. Kapacita zásobníku se pohybuje okolo 5 cm³. Pouzdra jsou k sobě přivařena, aby byl zásobník utěsněn. Na obvodu vnějšího pouzdra jsou v diametrálně protilehlých místech zhotoveny dva otvory s průměrem 150 μm, jak je znázorněno na obrázku Obr. 4-4 (a). Maznice se montuje na vnější distanční kroužek ložiskové jednotky. Mazání každého ložiska v sestavě se provádí samostatnými maznicemi nacházející se vedle každého ložiska, jak lze vidět na obrázku Obr. 4-4 (b). [43] [44]



Obr. 4-4 Odstředivá olejová maznice; (a) součásti maznice [43]; (b) schéma sestavy maznice [43]

Když se ložisková jednotka začne otáčet, otáčí se spolu s ložisky také maznice připevněná k vnějšímu distančnímu kroužku. Odstředivá síla způsobená rotací vytváří v uloženém oleji tlak, který vytlačuje olej otvory umístěnými na vnějším pouzdře. Vytlačený olej z otvorů je vhodně navrženými průtokovými cestami veden k povrchu ložiska. [44]

Pro regulaci průtoku se na otvorech zavádí omezovač. Zde se k regulaci používá kus izotropního porézního materiálu, jak je znázorněno na obrázku Obr. 4-4 (b). Průtočná oblast je skrz omezovač řízena tak, aby bylo dosaženo požadovaného průtoku. Materiál omezovače musí být homogenní a izotropní k zajištění rovnoměrné rychlosti proudění. Bylo zjištěno, že slinutý polyimid je pro tuto aplikaci ideálním materiálem. [43] [44]

Z literatury vyplývá, že k udržení souvislého filmu maziva na kontaktních plochách ložiska reakčního kola je zapotřebí průtok pouze $0,2 \mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$. Jedná se o velmi nízkou hodnotu, jejíž dosažení je téměř nemožné, ale jsou snahy o vývoj systémů zásobování s co nejnižším průtokem blížící se k hodnotě $10 \mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ [43]. Hmotností průtok maznice lze spočítat z rovnice

$$q = 0,326 \cdot \frac{\pi \cdot \rho^2 \cdot \omega^2 \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot (R_1^2 - R_2^2)$$

kde q je hmotnostní průtok v $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, ρ je hustota maziva v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, η je dynamická viskozita maziva v $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$, ω je úhlová rychlost reakčního kola v $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, r je poloměr otvoru pro odvod maziva do ložiska v m, L je tloušťka omezovače v m, R_1 je rádius k hladině maziva v zásobníku v m a R_2 je rádius, na kterém mazivo vstupuje do omezovače v m [44]. Oleji Fomblin Z25 přísluší hustota $1850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ při 20°C . Z té lze snadno dopočítat dynamickou viskozitu

$$\eta = \nu \cdot \rho = 0,000260 \cdot 1850 = 0,481 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$$

Dále je potřeba z otáček vypočítat úhlovou rychlost

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,159 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Tloušťka omezovače byla zvolena $1 \mu\text{m}$. Rozdíl druhých mocnin rádiusů R_1 a R_2 lze nahradit druhou mocninou hloubky h . Tato hloubka byla zvolena k zajištění co nejnižšího průtoku $2 \mu\text{m}$. Po dopočítání a převedení hmotnostního průtoku na vhodnější jednotku dostáváme

$$q = 0,326 \cdot \frac{\pi \cdot 1850^2 \cdot 314,159^2 \cdot (75 \cdot 10^{-6})^4}{8 \cdot 0,481 \cdot 10^{-6}} \cdot (2 \cdot 10^{-6})^2 = 0,04096 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Při úplném naplnění by se do zásobníku vešlo

$$m = V \cdot \rho = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1850 = 0,00925 \text{ kg} = 9250 \text{ mg}$$

Maznice by v takovém případě teoreticky vydržela dodávat mazivo po dobu zhruba 25,8 let. Pokud by se životnost měla pohybovat okolo požadovaných 6 let, stačilo by do zásobníku vložit $2152,16 \text{ mg}$ maziva.

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo na základě dostupných podkladů zmapovat problematiku ložisek a jejich mazání používaných u kosmických aplikací. V první části práce byla provedena rešerše o základních režimech mazání. Nejvíce je popsáno elastohydrodynamické mazání, protože v tomto režimu pracují valivá ložiska. V kapitole specifiky vesmírného prostředí jsou vyňaty hlavní faktory vesmíru ovlivňující správný chod ložisek a maziv. U samotných ložisek jsou specifikovány základní používané typy a jejich materiály, klece ložisek a v poslední řadě možnosti utěsnění.

Zbytek rešerše se zabýval popisem maziv. Hlavní zastoupení mají ve vesmíru maziva kapalná a tuhá, jsou tedy rozebrány nejvíce. Prvně byly tyto typy porovnány a vypsány jejich silné slabé stránky. U tuhých maziv jsou vyjmenovány způsoby nanesení na kluzné povrchy a popis vhodných tuhých látek vykazující mazací vlastnosti v kosmu. Kapalná maziva jsou rozebrána podobně. U jednotlivých typů jsou uvedeny i komerčně dostupné konkrétní oleje. V závěru rešerše jsou v menší míře rozebrána plastická maziva.

Diskuzní část je věnována návrhu tribologické soustavy pro reakční kolo satelitu na oběžné dráze. Ze začátku je popsáno reakční kolo a vysvětlen jeho princip a účel. Konkrétní ložiska a jeho klec byla vybrána z katalogu firmy Kaydon, a to na základě doposud zjištěných poznatků o vesmírné tribologii. Komerční mazivo je zvoleno tak, aby vyhovovalo aplikaci i zadaným hodnotám. Je navržena i maznice zajišťující dlouhodobý přívod maziva do kontaktních míst ložisek a na základě vypočteného hmotnostního průtoku určena i přibližná životnost celého tribologického systému.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JONES, W. a M. JANSEN. Space Tribology. BHUSHAN, Bharat. *Modern Tribology Handbook*. 1st Edition. CRC Press, 2000, s. 1159-1186. ISBN 9780849384035.
- [2] Stribeck curve. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stribeck_curve
- [3] Stribeck curve. In: *IntechOpen* [online]. 2013 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/ionic-liquids-new-aspects-for-the-future/tribological-properties-of-ionic-liquids>
- [4] ROBERTS, E. a M. EIDEN. *Space Tribology Handbook* [online]. 5th edition. Cheshire: European Space Tribology Laboratory, 2013 [cit. 2021-05-21]. 1123866322.
- [5] Hydrodynamic lubrication. In: *Machinery lubrication* [online]. 2014 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29654/journal-bearing-oil>
- [6] Types of Lubrication - Boundary, Hydrostatic, and Hydrodynamic. *Bright Hub Engineering* [online]. 2010 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/73568-hydrostatic-lubrication/#hydrostatic-lubrication>
- [7] Hydrostatic Lubrication. In: *Bright Hub Engineering* [online]. 2010 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/73568-hydrostatic-lubrication/#hydrostatic-lubrication>
- [8] HARTL, Martin. *VELMI TENKÉ ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZACÍ FILMY* [online]. Brno: VUTIUUM, 2005 [cit. 2020-11-29]. ISBN 80-214-3059-1. Dostupné z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/download/osobnosti/hartl-teze-prof-prednasky.pdf>
- [9] Elastohydrodynamické mazání. In: *VELMI TENKÉ ELASTOHYDRODYNAMICKÉ MAZACÍ FILMY* [online]. Brno: VUTIUUM, 2005 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/download/osobnosti/hartl-teze-prof-prednasky.pdf>

- [10] JONES, W. a M. JANSEN. Tribology for space applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2008, **222**(8), 997-1004 [cit. 2020-11-22]. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1243/13506501JET305
- [11] ZARETSKY, E. *Liquid lubrication in space*. Tribology International, 1990, s. 75-93.
- [12] FUSARO, Robert a Michael KHONSARI. *Liquid lubrication for space applications* [online]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 1992 [cit. 2020-11-29]. 19920022596. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/42811604.pdf>
- [13] Viscosity. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>
- [14] *Pressure and Temperature Dependent Viscosity Measurements of Lubricants With Polymeric Viscosity Modifiers* [online]. Akron: Timken Engineered Surfaces Laboratories, 2019 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2019.00018/full>
- [15] ROBERTS, E.W. a M.J. TODD. *Space and vacuum tribology*. Cheshire: European Space Tribology Laboratory, 1990, s. 157-167.
- [16] *Katalog valivých ložisek* [online]. SKF Group. 2019 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub54/Images/0901d1968096351e-Rolling-bearings---17000_1-CS_tcm_54-121486.pdf#cid-121486
- [17] Naklápěcí kuličkové ložisko. In: *SKF* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/productid-1204%20EKTN9>
- [18] Contact angle. In: *Kaydon bearings* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: https://www.kaydonbearings.com/typeA_angular_contact_bearings.htm
- [19] BURGESS, Rick a Dave VANLANGEVELDE. *4-point bearings do triple duty while saving space* [online]. Michigan: Kaydon Bearings, 2014 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.kaydonbearings.com/downloads/whitepapers/Kaydon-4ptBearingsWP.pdf>

- [20] Wire race bearing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wire_race_bearing
- [21] Jehlové ložisko. In: *Cromwell Tools* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.cromwell.co.uk/shop/bearings-and-transmissions/needle-roller/needle-roller-bearing-25-mm-bore-43-mm-od-30-mm-width-single-shield-naxk25z/p/KOY6771920R>
- [22] ZARETSKY, Erwin V. *Rolling Bearing Steels - A Technical and Historical Perspective* [online]. Cleveland, Ohio: Glenn Research Center, 2012 [cit. 2021-05-10].
- [23] Ložiska. *ZKL Group* [online]. 2012 [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/7-loziska-vseobecne-udaje#74>
- [24] Pressed cage. In: *Bearing news* [online]. 2017 [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://www.bearing-news.com/common-ball-bearing-cages-j-w-rj-tw-types/>
- [25] Massive cage. In: *Precision Components* [online]. [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: <http://pcomponents.com/sub/cages.php>
- [26] What is the difference between bearing Shields and bearing Seals?. *Bearing Tips* [online]. 2016 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.bearingtips.com/difference-bearing-shields-bearing-seals/>
- [27] Labyrintové těsnění. *E-konstruktor* [online]. 2014 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/labyrintove-tesneni>
- [28] Labyrintové těsnění. In: *SKF* [online]. [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/industrial-seals>
- [29] Lubricant. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lubricant>
- [30] Liquid lubrication. In: *SAFIC-ALCAN* [online]. Paris [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <http://www.safic-alcan.com/markets/performance-products/lubricants-mwf.html>

- [31] Transparent Organic Light-Emitting Diodes with Top Electrode Using Ion-Plating Method. *IEICE Transaction on Electronics* [online]. 2015, **98**-(11), 1035-1038 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: doi:10.1587/transele.E98.C.1035
- [32] Naprašování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Napra%C5%A1ov%C3%A1n%C3%AD#cite_note-:1-2
- [33] Gas-Stabilized Plasma. In: *Plasma spray coatings* [online]. 2002 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://degradation2.wordpress.com/alternatives/direct-current-dc-plasma/gas-stabilized-plasma-gsp/>
- [34] ERDEMIR, Ali. *Solid Lubricants and Self-Lubricating Films* [online]. Argonne National Laboratory, 2001 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais/8403_PDF_CH22.pdf
- [35] Movement of layers in relative motion. In: *SpringerLink: HighTemperature Solid Lubricating Materials* [online]. Boston, 2013 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-92897-5_1236
- [36] BRISCOE, M. a M. TODD. *Considerations on the lubrication of spacecraft mechanisms* [online]. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency. European Space Research and Technology Center, 1983 [cit. 2021-02-13]. ISBN 19830016612. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19830016612>
- [37] FUSARO, Robert L. *Self-lubricating polymer composites and polymer transfer film lubrication for space applications* [online]. OH, United States: NASA Lewis Research Center Cleveland, 1990 [cit. 2021-02-14]. ISBN 19900012546. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19900012546>
- [38] BUTTERY, M., B. WARDZINSKI a K. HOUTON. *MODERN SELF-LUBRICATING COMPOSITES FOR SPACE APPLICATIONS: PGM-HT & SINTIMID 15M* [online]. Cheshire: European Space Tribology Laboratory, 2011 [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.esmats.eu/esmatpapers/completelist.php?whichYear=2011>
- [39] JONES, W. a M. JANSEN. Liquid Lubricants and Lubrication. BHUSHAN, Bharat. *Modern Tribology Handbook*. 1st Edition. CRC Press, 2000, s. 361-382. ISBN 9780849384035.

- [40] WANG, Hai-Zhong, Song-Wei ZHANG, Dan QIAO, Da-Peng FENG a Wei-Min LIU. Tribological Performance of Silahydrocarbons Used as Steel-Steel Lubricants under Vacuum and Atmospheric Pressure. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2014, **2014** [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1155/2014/852386>
- [41] FUSARO, Robert L. *Lubrication of space systems* [online]. Cleveland, OH: Lewis Research Center, 1994 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19940024896>
- [42] HAMPSON, Matthew, Emyr ROBERTS, Richard WATTERS a Michael BUTTERY. *SPEED DEPENDENCE OF BEARING TORQUE - ANOMALOUS EFFECTS WITH GREASE LUBRICATION* [online]. Warrington, UK: European Space Tribology Laboratory, 2013 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.esmats.eu/esmatspapers/completelist.php?whichYear=2013>
- [43] KRISHNAN, Sathyan, Sang-Heon LEE, Hung-Yao HSU a Gopinath KONCHADY. *Lubrication of Attitude Control Systems* [online]. Australia: University of South Australia, 2011 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: https://cdn.intechopen.com/pdfs/13470/InTech-Lubrication_of_attitude_control_systems.pdf
- [44] A Bearing Cartridge Assembly for Long-Term Performance of Momentum/Reaction Wheels used in Spacecraft. *Tribology in Industry* [online]. 2014, **36**(1), 22-32 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <http://oaji.net/articles/2015/664-1423217927.pdf>
- [45] Reaction Wheel. In: *Rocket Lab* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.rocketlabusa.com/satellite-components/reaction-wheels/>
- [46] *Kaydon Reali-Slim Bearing Catalog* [online]. Muskegon, Michigan: Kaydon Corporation, 2020 [cit. 2021-05-11]. Dostupné z: https://www.kaydonbearings.com/downloads/210-603-Kaydon_Reali-Slim_Bearing_Catalog_Apr-2020.pdf
- [47] Endurakote-plated Kaydon bearing. In: *Plant Automation Technology* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.plantautomation-technology.com/products/kaydon-bearings/endurakote-plated-bearings>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

7.1 Seznam zkratk

EHD	elastohydrodynamické
HBN	hexagonální nitrid bóru
MAC	mnohonásobně alkylovaný cyklopentan
NPE	neopentylester
PAO	polyalfaolefin
PFPE	perfluorpolyether
POE	polyolester
PTFE	polytetrafluoretylen
PVD	physical vapour deposition
UHMWPE	polyethylen s mimořádně vysokou molární hmotností

7.2 Seznam symbolů a veličin

α	tlakově viskózní index
f	koeficient tření
h_{\min}	minimální tloušťka mazacího filmu
λ	mazací parametr
L	tloušťka omezovače
m	hmotnost
M	molární hmotnost
n	otáčky
η	dynamická viskozita

η_0	dynamická viskozita při atmosférickém tlaku
η_p	dynamická viskozita při působení tlaku p
ν	kinematická viskozita
ω	úhlová rychlost
p	tlak
q	hmotnostní průtok
ρ	hustota
r	poloměr otvoru pro odvod maziva do ložiska
R_1	rádus k hladině maziva v zásobníku
R_2	rádus, na kterém mazivo vstupuje do omezovače
R_{a1}, R_{a2}	drsnoti povrchu
T	termodynamická teplota
V	objem
W	rychlost vypařování

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 3-1	Hydrodynamické mazání [5].....	16
Obr. 3-2	Hydrostatické mazání [7]	16
Obr. 3-3	EHD mazání [9]	17
Obr. 3-4	Tlaky par a průměrné časy úbytku 10 µm filmu při 20 °C běžně používaných kapalných maziv ve vesmíru [12]	20
Obr. 3-5	Typy povrchové migrace olejů na površích [15]	23
Obr. 3-6	Naklápěcí kuličkové ložisko [17]	24
Obr. 3-7	Stykový úhel kuličkového ložiska s kosoúhlým stykem [18]	25
Obr. 3-8	Způsoby montáže dvojic ložisek [16].....	25
Obr. 3-9	Čtyřbodové kuličkové ložisko [19]	26
Obr. 3-10	Drátové ložisko [20]	26
Obr. 3-11	Jehlové ložisko [21]	27
Obr. 3-12	Druhy klecí valivých ložisek; a) Lisovaná klec [24]; b) Masivní klec [25] ..	29
Obr. 3-13	Krycí plechy kuličkového ložiska [26]	30
Obr. 3-14	Axiální labyrintové těsnění [28]	31
Obr. 3-15	Mazací olej [30]	31
Obr. 3-16	Schéma iontového pokovování [31].....	34
Obr. 3-17	Schéma naprašování [32].....	35
Obr. 3-18	Plazmové stříkání [33]	36
Obr. 3-19	Znázornění vrstvené krystalické struktury disulfidu molybdenu [34]	36
Obr. 3-20	Pohyb vrstev struktury při relativním pohybu [35].....	37
Obr. 4-1	Reakční kolo satelitu [45].....	50
Obr. 4-2	Ložisková jednotka reakčního kola [43].....	51
Obr. 4-3	Kaydon kuličkové ložisko s Endurakote povlakem [47].....	52
Obr. 4-4	Odstředivá olejová maznice; (a) součásti maznice [43]; (b) schéma sestavy maznice [43]	53

Graf 3-1	Stribeckova křivka [3].....	15
Graf 3-2	Závislost λ na procentuální tloušťce filmu [4]	18
Graf 3-3	Závislost viskozity na teplotě maziv [12]	22
Graf 3-4	Závislost zatížení na koeficientu tření ve vakuu [4]	38
Graf 3-5	Závislost koeficientu tření na tloušťce povlaku [4]	39
Graf 3-6	Závislost koeficientu tření na čase u PFPE maziva [1]	43
Graf 3-7	Efekt olověných a MoS ₂ povlaků na životnosti PFPE maziv [4]	44
Graf 3-8	Závislost koeficientu tření na čase u MAC maziva [1]	46
Graf 3-9	Chování kroutícího momentu v závislosti na otáčkách pro plastická a kapalná maziva [42]	49

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1	Materiály valivých ložisek pro vesmírné aplikace [4]	28
Tab. 3-2	Vlastnosti minerálních olejů pro vesmírné aplikace [4]	41
Tab. 3-3	Vlastnosti PFPE olejů pro vesmírné aplikace [4]	42
Tab. 3-4	Vlastnosti PAO a MAC olejů pro vesmírné použití [4] [1]	45
Tab. 3-5	Vlastnosti plastických maziv pro vesmírné použití [4]	48